



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUT

OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VENTILÁTORŮ

VERIFICATION OF FAN PARAMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB TRNKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Trnka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ověření vlastností ventilátorů

v anglickém jazyce:

Verification of Fan parameters

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základem práce je seznámení se s vlastnostmi a typy vzduchových ventilátorů a ověření vlastností vybraných dodaných vzorků na zkušební trati.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte základní rešerži o vlastnostech a typech ventilátorů
2. U vybraných vzorků stanovte a vyhodnoťte jejich charakteristiku



Seznam odborné literatury:

Schwarezer Jan, Charakteristika ventilátorů, Praha 2011,
https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/IB_EXM_char_ventilatoru_FINALL.pdf

Čermák Jan: Ventilátory, 1974, SNTL

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

V této bakalářské práci se pojednává o ventilátorech a ventilátorových charakteristikách. Obsahuje rozdělení ventilátorů, popis základních typů a seznamuje s ventilátorovými charakteristikami. Část práce obsahuje popis měření ventilátorové charakteristiky a její zpracování.

Klíčová slova

Ventilátor, charakteristika ventilátoru, doprava vzduchu, měření charakteristik ventilátoru.

Abstract

In this bachelor thesis there is dealt about fan and fan parameters. Thesis contains division of fan, description of basic types and it introduces us with fan parameters. Part of thesis contains description of measurement of fan parameters and it's processing.

Key words

Fan, fan parameter, transport of air, measurement of fan parameters.

Bibliografická citace

TRNKA, J. *Ověření vlastností ventilátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce. Použité zdroje jsou uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

Ve Vysokém Mýtě dne 27. Května 2013

.....

Jakub Trnka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, kterými mi pomohl vypracovat tuto bakalářskou práci. Děkuji rodině za bezmeznou podporu a pomoc při studiu.

Obsah

1 Úvod	- 9 -
2 Ventilátory	- 10 -
2.1 Důležité vztahy a pojmy	- 10 -
2.2 Hlavní části ventilátoru	- 11 -
2.3 Princip	- 11 -
2.4 Charakteristiky ventilátorů	- 12 -
2.4.1 Podobnostní čísla	- 13 -
2.4.2 Ztráty a účinnosti	- 14 -
2.5 Metody měření ventilátorových charakteristik	- 14 -
2.6 Měřicí přístroje - průtokoměry	- 15 -
2.6.1 Tepelné průtokoměry	- 15 -
2.6.2 Vrtulkové průtokoměry	- 15 -
2.6.3 Pitotova trubice	- 15 -
2.7 Regulace ventilátorů	- 15 -
2.8 Rozdělení	- 17 -
2.8.1 Radiální ventilátory	- 19 -
2.8.1.1 Radiální nízkotlaké ventilátory	- 20 -
2.8.1.2 Radiální středotlaké ventilátory	- 20 -
2.8.1.3 Radiální vysokotlaké ventilátory	- 20 -
2.8.2 Axiální ventilátory	- 20 -
2.8.2.1 Axiální přetlakové ventilátory	- 22 -
2.8.2.2 Rovnotlaké ventilátory	- 22 -
2.9 Konstrukce ventilátorů	- 23 -
2.9.1 Konstrukce axiálních ventilátorů	- 23 -
2.9.2 Konstrukce radiálních ventilátorů	- 24 -
2.9.3 Společné prvky	- 26 -
2.10 Průvodní jevy	- 27 -
3 Měření ventilátorových charakteristik	- 29 -
3.1 Popis trati	- 30 -
3.2 Měřicí přístroje	- 31 -
3.3 Tabulky naměřených dat	- 31 -
3.3.1 Polohy měření - měřicí body	- 31 -
3.3.2 Naměřené hodnoty	- 32 -
3.3.3 Ventilátor I	- 33 -

3.3.4 Ventilátor II.....	- 34 -
3.3.5 Ventilátor III	- 35 -
3.3.6 Ventilátor IV	- 36 -
3.3.7 Ventilátor V	- 37 -
3.4 Rovnice pro vyhodnocení	- 38 -
3.5 Vyhodnocení naměřených dat.....	- 38 -
3.5.1 Vzorový výpočet.....	- 39 -
3.5.2 Ventilátor I.....	- 40 -
3.5.3 Ventilátor II.....	- 40 -
3.5.4 Ventilátor III	- 41 -
3.5.5 Ventilátor IV	- 41 -
3.5.6 Ventilátor V	- 42 -
3.6 Naměřené charakteristiky	- 43 -
3.6.1 Ventilátor I.....	- 43 -
3.6.2 Ventilátor II.....	- 44 -
3.6.3 Ventilátor III	- 45 -
3.6.4 Ventilátor IV	- 46 -
3.6.5 Ventilátor V	- 47 -
3.6.6 Charakteristika potrubní sítě	- 48 -
4 Závěr	- 50 -
Literatura.....	- 51 -
Seznam obrázků a tabulek	- 53 -
Seznam použitých symbolů	- 54 -
Seznam indexů	- 55 -

1 Úvod

V běžném životě se s ventilátory setkáváme často. Dopravují čerstvý vzduch do místnosti, ve které se nacházíme, nebo odvádějí zplodiny od místa spalování. Toto jsou jen některé příklady využití. Ventilátory se hojně využívají zejména ve vzduchotechnice, ale také v rozličných průmyslových odvětvích - energetika, hutní, sklářský, elektrotechnický průmysl apod. Notoricky známý je ventilátor, který se vyskytuje hlavně v kancelářích. Samotný ventilátor je obklopen kovovou nebo plastovou mříží a umístěn na teleskopickou stojnou nohu.

Podle oboru použití se kladou na ventilátory rozdílné požadavky a nároky na konstrukci a vlastnosti. Ventilátor použitý k chlazení výpočetní techniky by měl mít nízkou cenu, malé rozměry a produkovat slabý hluk. Oproti tomu, ventilátory v lomech nebo dolech musí splňovat podmínku nehořlavosti a dlouhodobé výdrže. Hlavní roli také hrají požadavky zákazníka.

První část mé práce obsahuje souhrnné informace o ventilátorech, jejich rozdělení a stručné charakteristiky jednotlivých typů ventilátoru, konstrukci ventilátorů a průvodní jevy, které se pojí s provozem ventilátorů. Druhá část práce se zabývá ventilátorovými charakteristikami, způsobem měření a měřicími přístroji. Z naměřených dat se pak vypočítají potřebné veličiny, které se graficky znázorňují a následně vyhodnocují.

2 Ventilátory

Definice ventilátoru je podle odborné literatury „*Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje, které jsou určeny ke kontinuální dopravě vzdušin při malých kompresních poměrech.*“ [1]

Kompresní poměry, které se při provozu ventilátorů využívají, jsou malé, nabývají hodnot 1.01-1.1, výjimečně až 1.3 nebo 1.5 pro víceúrovňové ventilátory. Proto se v souvislosti s ventilátory spíše hovoří o dopravě než o kompresi. Na rozdíl od objemových strojů, kde se pracuje s uzavřeným objemem, lopatkové stroje používají otevřený objem. Navíc mají vstupní a výstupní prostory spojeny stále.

Ve ventilátorech dochází také ke změně mechanické energie na energii tepelnou, která je předána vzdušině [1].

2.1 Důležité vztahy a pojmy

- Vzdušina - souhrnný název plynů a par, látka, která zaplní maximální možný objem [11].
- Rychlostní trojúhelník ukazuje kinematické vlastnosti lopatkového stroje. Jedná se o vektorový součet unášivé a relativní rychlosti. Úhel, který tyto rychlosti svírají, se nazývá úhel lopatky a označuje se β_2 [7].
- Kompresní poměr je poměr mezi celkovým objemem a objemem stlačujícího prostoru [12].
- Rovnice kontinuity pro nestlačitelný plyn

$$S_1 \cdot c_1 = S_2 \cdot c_2, \quad (2.1)$$

kde S [m^2] je průřez, c [m/s] rychlost vzdušiny. Jedná se o zákon zachování hmoty. V případě stlačitelného média se obě strany rovnice vynásobí hustotou [10].

- Bernoulliho rovnice

$$\frac{p_1}{\rho} + h_1 \cdot g + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + h_2 \cdot g + \frac{c_2^2}{2} + Y_{12}, \quad (2.2)$$

kde p (Pa) je tlak, ρ (kg/m^3) hustota, h (m) výška sloupce, g (m/s^2) gravitační zrychlení, c (m/s) rychlost vzdušiny, Y_{12} jsou ztráty v potrubí. Bernoulliho rovnice představuje zákon zachování energie [13].

- Stavová rovnice

$$p = \rho \cdot r \cdot T, \quad (2.3)$$

kde p (Pa) je absolutní statický tlak, T (K) je termodynamická teplota, ρ (kg/m^3) hustota, r (J/kgK) plynová konstanta [10].

2.2 Hlavní části ventilátoru

Základní části ventilátoru jsou: rotor, skříň, základový rám, pohon, eventuálně převodová ústrojí. Rotor je složen z jednoho či více oběžných kol, hřídele, řemenice nebo poloviny spojky [1].

2.3 Princip

V části ventilátoru, která se nazývá průtočná, předává oběžné kolo vzdušinu energii - mechanickou. Zdrojem této energie je pohon ventilátoru. Celkový tlak ventilátoru je přírůstek energie jednotkového objemu vzdušiny. Vzdušina je stlačitelná, a jelikož se mění její tlak, mění se také její měrná hmotnost. Jak již bylo uvedeno, ventilátory pracují při nízkých kompresních poměrech, proto změnu stavu vzdušiny můžeme považovat za isochorickou. Při vyšších kompresních poměrech se pracuje s dějem adiabatickým [2].

Energii dopravované vzdušiny lze vyjádřit pomocí Bernoulliho rovnice. Energie 1kg vzdušiny na vstupu má velikost:

$$E_1 = \frac{p_1}{\rho} + h_1 \cdot g + \frac{c_1^2}{2} \quad [J/kg]. \quad (2.4)$$

Obdobně energie vzdušiny na výstupu ventilátoru:

$$E_2 = \frac{p_2}{\rho} + h_2 \cdot g + \frac{c_2^2}{2} \quad [J/kg]. \quad (2.5)$$

Měrná dopravní práce je rozdílem těchto energií:

$$Y_{12} = E_2 - E_1 \quad [J/kg]. \quad (2.6)$$

Teoretický dopravní tlak ventilátoru, který má na oběžném kole nekonečný počet lopatek, lze vyjádřit vztahem

$$\Delta p_{th\infty} = (p_2 - p_1) + (h_2 - h_1) \cdot g \cdot \rho + (c_2^2 - c_1^2) \cdot \frac{\rho}{2} \quad [Pa]. \quad (2.7)$$

Skutečný dopravní tlak určuje rovnice

$$\Delta p = \Delta p_{th} \cdot \eta_h = \Delta p_{th\infty} \cdot \varepsilon \cdot \eta_h \quad [Pa], \quad (2.8)$$

kde η_h (-) je hydraulická účinnost a ε (-) poměr teoretického dopravního tlaku s konečným počtem lopatek a teoretického dopravního tlaku s nekonečným počtem lopatek [2].

Mechanická energie, která je předána vzdušině, lze vypočítat jako práci vykonanou pístem, který má plochu S , a pohybuje se ve válcovém potrubí proti konstantnímu přetlaku Δp po délce l v čase τ . Takový výkon lze vypočítat pomocí výrazu

$$P = \frac{\Delta p \cdot S \cdot l}{\tau} \quad [W]. \quad (2.9)$$

Ve ventilátoru dochází k vnitřním ztrátám energie, přírůst energie jednotkového objemu vzdušiny je menší než energie dodaná ventilátoru pro přepravu jednotkového objemu vzdušiny [2].

2.4 Charakteristiky ventilátorů

Základními pojmy při popisu ventilátorových charakteristik (obr. 2.1) jsou charakteristika sítě, tlaková charakteristika ventilátoru a provozní bod. Ventilátor pracuje při podmínkách, které odpovídají provoznímu bodu. Tlaková charakteristika ventilátoru je závislost dopravního tlaku a průtoku vzdušiny během konstantních otáček a hustotě vzduchu. Charakteristikou sítě (obr. 2.2) rozumíme závislost přetlaku, který je nutný k dosažení daného průtoku. Jedná se o exponenciální závislost [1,2].

Ventilátor, který pracuje v potrubní síti, musí při dopravě vzdušiny překonávat hydraulické ztráty. Pro jejich výpočet se používá vztah

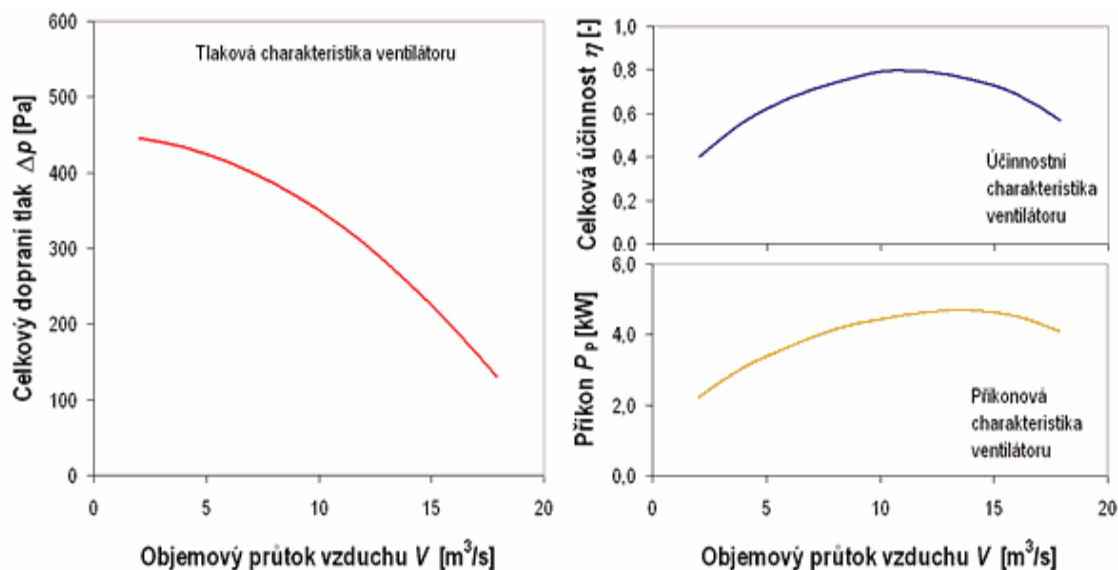
$$\Delta p_z = K \cdot \dot{V}^2 \text{ (Pa)}, \quad (2.10)$$

kde konstanta $K \text{ (Pa} \cdot \text{s}^2/\text{m}^6\text{)}$ představuje tlakovou ztrátu potrubí. Při přepravě vzdušiny do míst s konstantním přetlakem p_{st} se musí tento přetlak k rovnici (2.10) připočítat. Charakteristika má tvar polynomu druhého řádu - paraboly. Umístíme-li charakteristiku ventilátoru a charakteristiku potrubní sítě do jednoho grafu, pak jejich průsečík nazýváme pracovním bodem. Tento bod je specifický pro různé kombinace ventilátorů a potrubních sítí a je nejvhodnější pro optimální chod ventilátoru. Tyto závislosti umožňují přímou konfrontaci jednotlivých ventilátorů [1].

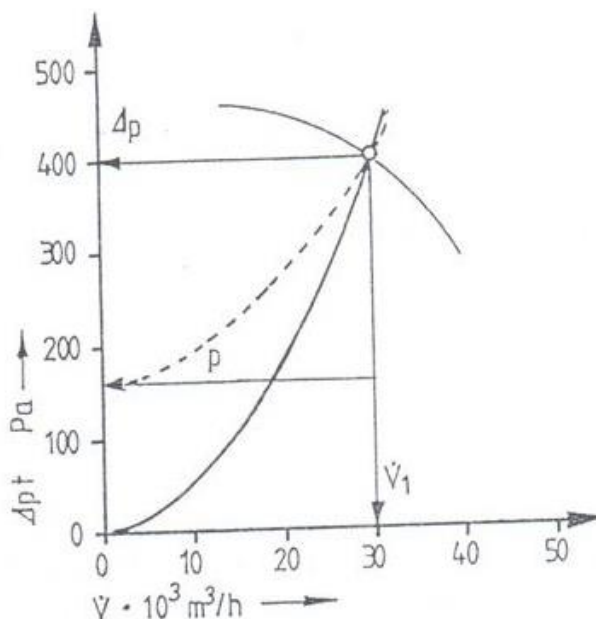
Obecné charakteristiky ventilátoru jsou závislosti zkoumané veličiny na objemovém průtoku vzduchu. Z hlediska zkoumané veličiny lze charakteristiky dělit

- Tlaková charakteristika
- Příkonová charakteristika
- Účinnostní charakteristika.

Tyto charakteristiky bývají součástí dokumentace, kterou poskytuje výrobce [8].



Obr. 2.1 Obecné charakteristiky ventilátoru [8]



Obr. 2.2 Charakteristika potrubní sítě [2]

2.4.1 Podobnostní čísla

Při konstruování a návrzích strojů je výhodné používat mechanickou podobnost. To znamená, že při konstrukci lopatkového stroje lze využít poznatky z konstruování stroje geometricky a aerodynamicky podobného. K výpočtům se potom používají podobnostní čísla. Základní parametry potřebné pro určení podobnostních čísel jsou velký průměr oběžného kola D_2 (m), šířka kola b_2 (m), otáčky ventilátoru n (1/s), obvodová rychlost kola u_2 (m/s), dopravované množství vzdušiny V (m³/s), dopravní tlak ventilátoru Δp (Pa), hustota vzduchu ρ (kg/m³) a celková účinnost ventilátoru η_c (-)[1,2].

- Tlakové číslo ψ

$$\psi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \cdot u_2^2} \quad [-] \quad (2.11)$$

- Průtokové číslo φ

$$\varphi = \frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot u_2} \quad [-] \quad (2.12)$$

- Výkonové číslo λ

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot \psi}{\eta_c} \quad [-] \quad (2.13)$$

- Velikostní číslo

$$\delta = \frac{D_2}{d_2} \quad [-] \quad (2.14)$$

Také se využívají procentní charakteristiky. To jsou závislosti celkového dopravního tlaku, účinnosti nebo příkonu na objemovém průtoku. Veličiny jsou v poměru s mezním stavem [1,2].

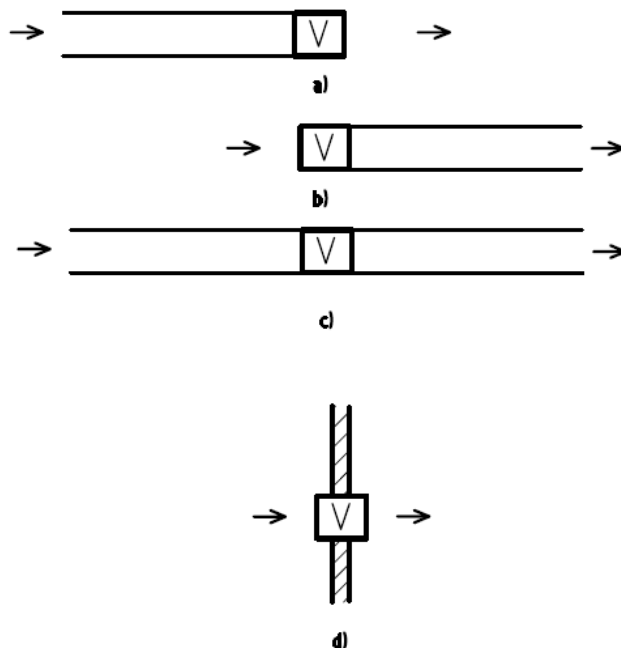
2.4.2 Ztráty a účinnosti

Provoz ventilátoru je provázen různými ztrátami, které jsou vyvolány určitými negativními vlivy. Hydraulické ztráty souvisí s prouděním vzduchu v průtočných kanálech. Tření krycího a nosného kotouče o vzduch vytváří ztráty kotoučové. Ztráty objemové jsou důsledkem netěsností mezi oběžným kolem a sacím hrdlem ventilátoru. A v neposlední řadě se jedná o ztráty mechanické spojené s odporem v ložiscích nebo s nedokonalostmi spojení ventilátoru a elektromotoru [1].

2.5 Metody měření ventilátorových charakteristik

Měření ventilátorů probíhá na speciálních aerodynamických tratích. Pro tratě se nejčastěji používá kruhové potrubí konstantního průřezu nebo komora. Potrubí se používá přímé, neboť v kolenech a rozích vznikají ztráty. Měření probíhá pro různé zapojení [1].

- Typ A - potrubí na sání (obr. 2.3a)
- Typ B - potrubí na výtlaku (obr. 2.3b)
- Typ C - potrubí na sání a na výtlaku (obr. 2.3c)
- Typ D - ventilátor ve stěně (obr. 2.3d)



Obr. 2.3 Typy instalace ventilátoru v potrubním zřízení[1]
a - typ A, b - typ B, c - typ C, d - typ D

V potrubí se musí vytvořit otvory, které se používají pro umístění měřících přístrojů.

Pro měření tlaků se využívají anemometry, kapalinové mikromanometry, kapalinové manometry, atd. Příkon ventilátoru lze měřit dynamometrem nebo se změří příkon pohonu.

Měřit charakteristiky lze v laboratořích i za provozu. V laboratořích se měří objemový průtok zpravidla pomocí škrticích orgánů. Za provozu se zjišťuje sondáží rychlostního profilu. K tomu se musí vybrat vhodný úsek - dlouhý, přímý, konstantní průřez. Podle velikosti průřezu se volí počet měřicích bodů (obvykle 3-7) [1].

2.6 Měřicí přístroje - průtokoměry

Průtokoměry neboli anemometry jsou přístroje k měření průtoku kapalin a plynů. Lze je dělit podle různých kritérií.

2.6.1 Tepelné průtokoměry

Tepelné průtokoměry - termoanemometry - měří hmotnostní průtok pomocí výměny tepla mezi zdrojem tepelné energie a okolím. Tepelné průtokoměry jsou velice přesné a měří rychle. Princip je v měření teplotním rozdílu na měřicím elementu - o kolik se ochladí v daném prostředí - a z toho se vypočítá průtok [5].

2.6.2 Vrtulkové průtokoměry

Vrtulkové anemometry měří rychlost průtoku na základě mechanického otáčení vrtulky. Podle rychlosti vrtulky je možné určit rychlost proudícího média. Tento typ měřicího přístroje se hojně používá v meteorologii a ve vzduchotechnice.

2.6.3 Pitotova trubice

Tento způsob měření využívá rozdílu mezi statickým a totálním tlakem, z čehož se vypočítá rychlost proudění. Průtok je poté záležitostí jediného vzorce. Měření Pitotovou trubicí je náročné, musí se správně nastavit otvor pro měření totálního tlaku. Speciálním případem je Prandlova trubice [5].

2.7 Regulace ventilátorů

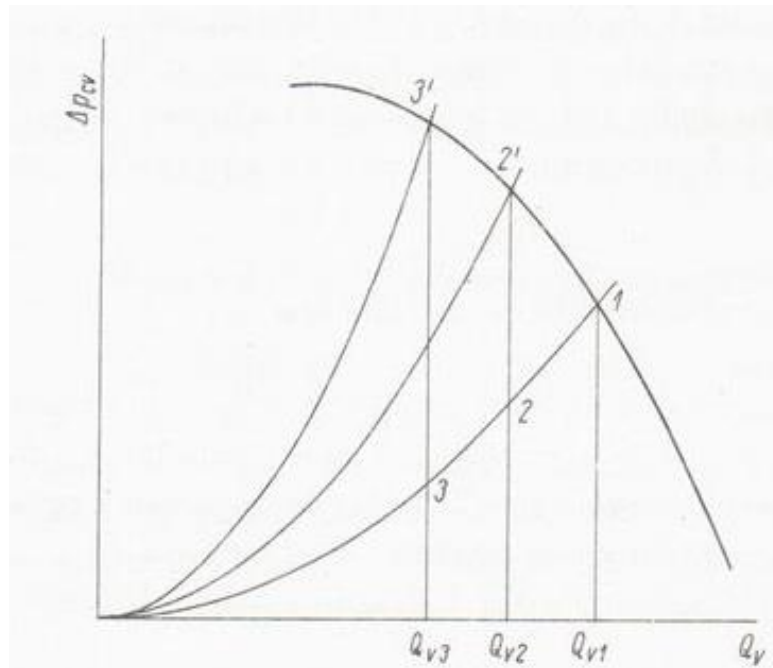
Regulací výkonu ventilátoru se ovlivňují aerodynamické parametry ventilátoru, aby se dosáhlo změny průtoku a celkového tlaku.

K regulaci dopravovaného vzduchu lze využít několika způsobů

- přerušování chodu
- škrcení
- změna otáček
- natáčením naváděcích lopatek
- natáčení lopatek u oběžného kola (u ventilátorů axiálních).

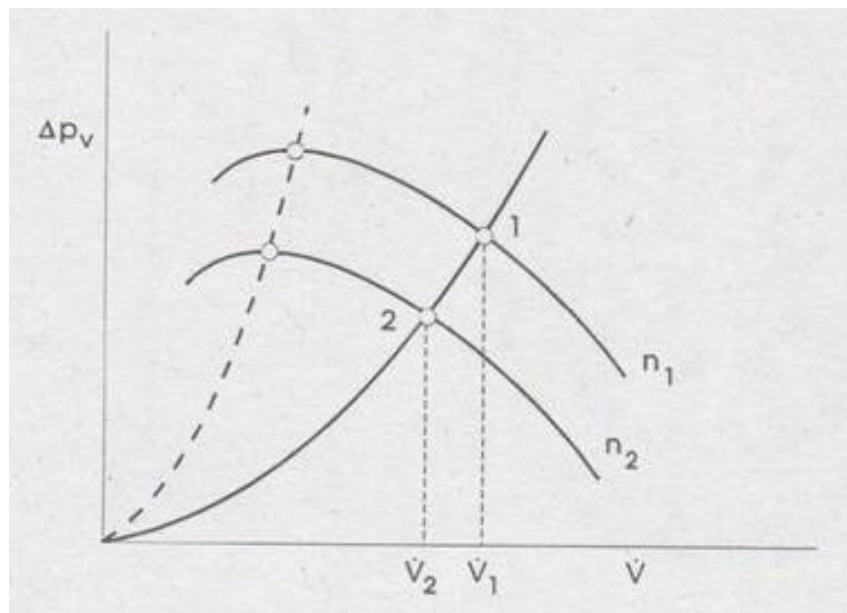
Přerušování chodu se provádí připojováním a odpojováním pohonu.

Při regulaci škrcením (obr. 2.4) dojde k posunutí provozního bodu. Při zmenšení průtoku z \dot{V}_1 na \dot{V}_2 dojde k tlakové ztrátě Δp , charakteristika sítě je poté strmější. Regulace škrcením probíhá za konstantních otáček. Umístíme-li škrticí orgán nevhodně, dojde ke zvýšení hlukosti celého zařízení. Regulace škrcením se využívá jako krátkodobé řešení nebo pro malé výkony, je totiž velice neekonomická [1,3,4,6].



Obr. 2.4 Regulace ventilátoru škrcením [1]

Se změnou otáček (obr. 2.5) dochází i ke změně celé charakteristiky ventilátoru. Jednotlivé otáčky mají jinou charakteristiku, jejíž grafická interpretace je kongruentní křivkou a všechny takovéto křivky mají vrcholy na společné parabole. Když se změní průtok \dot{V}_1 na \dot{V}_2 , musí se zjistit otáčky n_2 nové charakteristiky. Otáčky lze měnit pomocí asynchronního motoru s měničem frekvence, přestavitelnými řemenicemi, atd. [1,3,4,6].



Obr. 2.5 Regulace ventilátoru změnou otáček [3]

Charakteristiku ventilátoru můžeme změnit také natáčením lopatek [1].

2.8 Rozdělení

Nejdůležitější rozdělení ventilátorů je podle směru průtoku vzdušiny přes oběžné kolo (obr. 2.6) [1,8]

- Radiální ventilátory

Vzdušina je nasávána v axiálním směru (směr rotace), její výtlak probíhá ve směru radiálním (směr kolmý na směr rotace).

- Axiální ventilátory

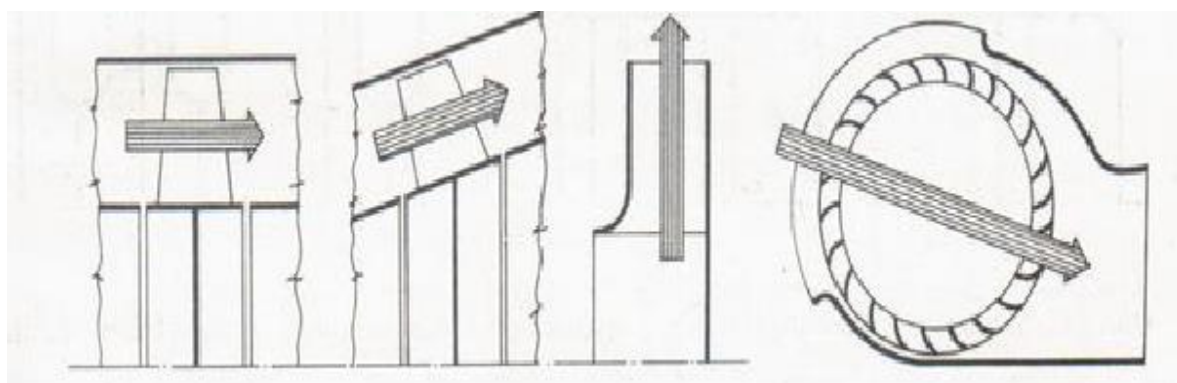
Vzdušina proudí ventilátorem ve směru osy rotace.

- Diagonální ventilátory

Vzdušina je nasávána v axiálním směru, ale ve ventilátoru dojde ke změně směru proudění o úhel menší než 90° . Diagonální ventilátory leží na přechodu mezi ventilátory radiálními a axiálními.

- Diametrální ventilátory

Tento druh ventilátoru vzdušinu urychluje dvoustupňově. Směr pohybu vzdušiny je kolmý na osu rotace.

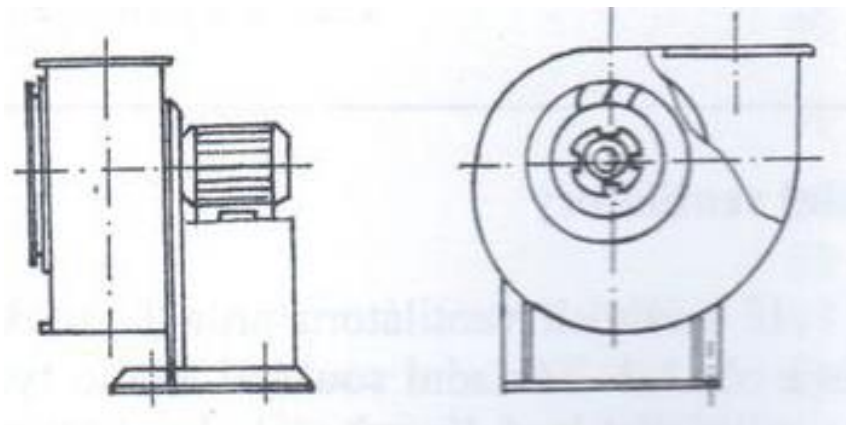


Obr. 2.6 Směr průtoku vzdušiny oběžným kolem ventilátoru - axiální, diagonální, radiální, diametrální[1]

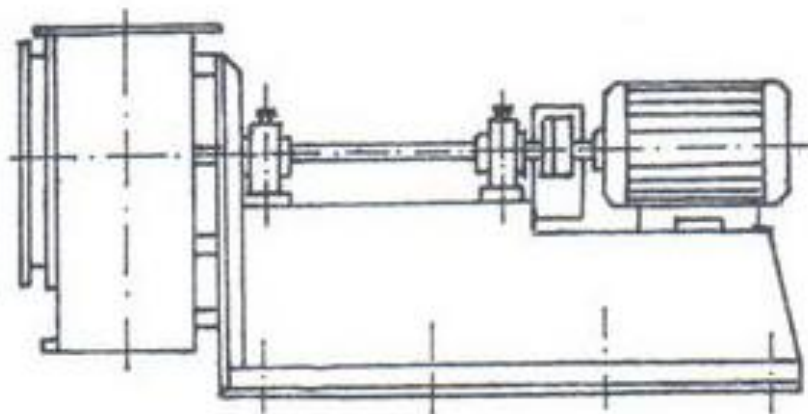
Dále je ventilátory možné dělit např. podle:

- Počtu stupňů:
 - Jednostupňové ventilátory
 - Vícestupňové ventilátory - soustava několika jednostupňových ventilátorů
- Maximálního dosažitelného celkového tlaku ventilátoru
 - Nízkotlaké - do 1 kPa
 - Středotlaké - 1 až 3,5 kPa
 - Vysokotlaké - nad 3,5 kPa

- Druhu pohonu
 - Elektromotor
 - Pneumatický pohon
 - Ruční pohon
- Způsobu spojení rotoru ventilátoru a pohonu
 - Napřímo (obr. 2.7)
 - Na spojku (obr. 2.8)
 - S převodovým ústrojím



Obr. 2.7 Ventilátor připojený napřímo [2]



Obr. 2.8 Ventilátor připojený přes spojku [2]

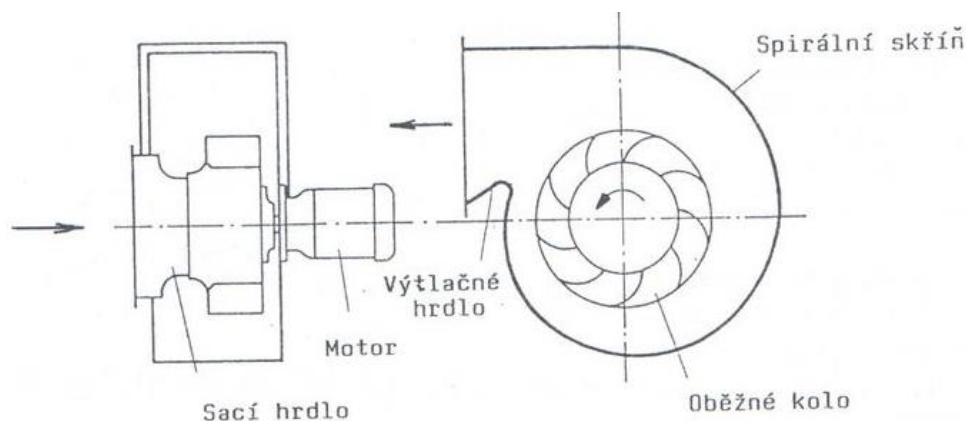
- Polohy osy rotoru
 - Vertikální
 - Horizontální

2.8.1 Radiální ventilátory

Radiální ventilátor (obr. 2.9) nasává vzdušinu ve směru axiálním a vytlačí ji ve směru radiálním. Z toho důvodu lze uvažovat, že složka rychlosti ve směru rotace vzduchu vstupujícího do ventilátoru je nulová. Tím se zjednoduší vztah pro teoretický dopravní tlak

$$\Delta p_{th\infty} = \rho \cdot u_2 \cdot c_{2u} \quad [Pa], \quad (2.15)$$

kde u_2 (m/s) je obvodová rychlost na velkém průměru kola, c_{2u} (m/s) průmět absolutní rychlosti do směru vektoru u_2 , ρ (kg/m³) je hustota vzdušiny [1,2].



Obr. 2.9 Radiální ventilátor [2]

Stupeň reakce κ je poměrná hodnota statického tlaku

$$\kappa = \frac{\Delta p_{stat.th\infty}}{\Delta p_{th\infty}} = \frac{u_2^2 - u_1^2 + w_1^2 - w_2^2}{2 \cdot u_2 \cdot c_{2u}} \quad [-]. \quad (2.16)$$

Ke stanovení složky statického dopravního tlaku se využije ventilátorové rovnice pro několik předpokladů:

- Výstup z ventilátoru je uzavřený, proto nedochází k průtoku vzduchu. Z tohoto důvodu jsou rychlosti vzduchu (absolutní i relativní) nulové a tím pádem je nulový i dynamický tlak. V tomto případě platí, že dopravní tlak nabývá hodnoty

$$\Delta p_{th\infty} = \frac{\rho}{2} (u_2^2 - u_1^2) = \Delta p_{stat.th\infty} \quad [Pa]. \quad (2.17)$$

- Vezmeme-li si rovnici kontinuity, tak je zřejmé, že $w_1^2 > w_2^2$ platí ve chvíli, kdy platí $\pi \cdot b_1 \cdot D_1 < \pi \cdot b_2 \cdot D_2$. Po dosazení do Bernoulliho rovnice se zjistí přírůstek statického tlaku

$$\Delta p_{stat.th\infty} = \frac{\rho}{2} (w_1^2 - w_2^2) \quad [Pa]. \quad (2.18)$$

Radiální ventilátory se hodí jen pro určitou oblast tlakových a objemových čísel [1,2].

2.8.1.1 Radiální nízkotlaké ventilátory

Tyto ventilátory se používají především pro nízkotlakou klimatizaci nebo větrací zařízení. Slouží k dopravě čisté nebo lehce znečištěné vzdušiny. Oběžná kola nízkotlakých ventilátorů mají velký počet lopatek, které jsou zahnuté dopředu, a velkou poměrnou šířkou.

Aerodynamické vlastnosti:

- Tlakové číslo $\psi - 2,3 \div 2,9$
- Průtokové číslo $\phi - 0,5 \div 0,7$
- Celková účinnost $\eta_c - 65 \div 70\%$ [1].

2.8.1.2 Radiální středotlaké ventilátory

Pro větrání, odsávání a vysokou klimatizaci se hodí používat ten typ ventilátorů. Oběžná kola mají lopatky zahnuté dozadu. Počet lopatek se pohybuje mezi 6 až 12.

Aerodynamické vlastnosti:

- Tlakové číslo $\psi - 0,9 \div 1,1$
- Průtokové číslo $\phi - 0,2 \div 0,29$
- Celková účinnost $\eta_c - 82 \div 86\%$ [1].

2.8.1.3 Radiální vysokotlaké ventilátory

Tyto ventilátory mají největší využití především v průmyslu - energetickém, chemickém, hutnickém. Oběžná kola obsahují 8 až 16 lopatek, které jsou zahnuté dozadu.

Aerodynamické vlastnosti:

- Tlakové číslo $\psi - 0,9 \div 1,3$
- Průtokové číslo $\phi - 0,07 \div 0,13$
- Celková účinnost $\eta_c - 83 \div 86\%$ [1].

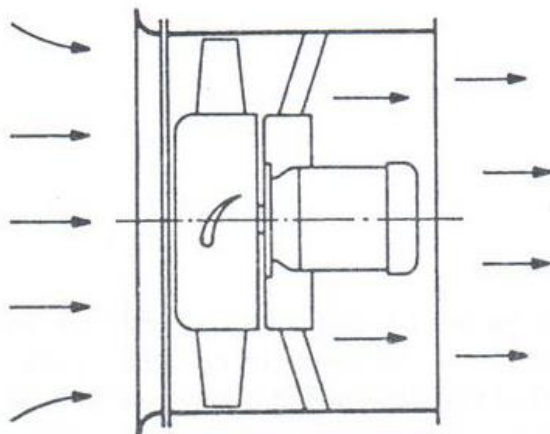
2.8.2 Axiální ventilátory

Vzdušina do tohoto typu ventilátoru (obr. 2.10) vstupuje ve stejném směru, jako ve kterém z něj vystupuje - ve směru osy rotace. Axiální ventilátory se používají pro řešení problémů, kde nejsou kladeny požadavky na hodnotu dopravního tlaku a zároveň je žádoucí vysoký průtok vzduchu. Axiální ventilátory se hodí i pro vysoké otáčky $n_b \in \langle 0,25 \div 1,8 \rangle$.

Základní typy axiálních ventilátorů jsou:

- Ventilátory přetlakové
- Ventilátory rovnotlaké

Prvně jmenované v oběžném kole přeměňují kinetickou energii na energii tlakovou. Statický tlak, který je potřebný k překonání hydraulických ztrát, se vytváří v kole. „U rovnotlakých ventilátorů je statický tlak za oběžným kolem přibližně roven statickému tlaku před kolem. Proto musí rovnotlaký ventilátor obsahovat kvalitní difusor, zajišťující vzrůst statického tlaku.“ [1]



Obr. 2.10 Axiální ventilátor[2]

Axiální ventilátory obsahují vstupní dýzu, která zajišťuje homogenní rychlostní pole po celém průřezu před oběžným kolem, dále oběžné kolo, kde se transformuje energie, a lopatkovou mříž obsahující lopatky [1,2].

Prvkem mříže je lopatka. U lopatek se hledá co nejlepší profil - aerodynamický tvar, což je tvar příčného průřezu. Profily byly vytvářeny na základě výpočtů a dlouhodobých výzkumů. Těmto výzkumům velice pomohly poznatky získané z leteckého průmyslu, kde se podobně tvarují křídla letadel. Lopatkové mříže lze, mimo jiné, rozdělit podle způsobu ovlivnění rychlosti vzdušiny na konfuzorové, akční, difuzorové [2].

Profily jsou charakterizovány tvarem přímky zvané střednice. Střednice je spojnice kružnic vepsaných do daného profilu. Obecně se dává přednost střednicím zahnutým. Další křivkou, kterou lze na průřezu lopatky najít, je tětíva profilu. Tětíva spojuje odtokovou hranu a spodní vydutí profilu. Výška profilu h [m] je kolmá vzdálenost tětívy a horního vydutí profilu. Hloubkou profilu l [m] je nazývána vzdálenost čelní a odtokové hrany profilu. Dále lze určit úhel náběhu α [-], což je odklon tečny profilu od směru proudění vzdušiny. Štíhlost lopatky λ se vypočítá

$$\lambda = \frac{L}{l} = \frac{D - d}{2l} \quad [-], \quad (2.19)$$

kde L [m] je délka lopatky, D [m] velký průměr oběžného kola a d [m] malý průměr oběžného kola [2].

Pro lopatkové mříže jsou důležité údaje rozteč t [m], což je vzdálenost mezi lopatkami, a úhel nastavení γ [-]. Ztrátový součinitel mříže ζ [-] je charakteristický parametr a jeho hodnota se určí vztahem

$$\zeta = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot w_1^2} \quad [-], \quad (2.20)$$

kde p_1 [Pa] je celkový tlak před tlakovou mříží a p_2 [Pa] je celkový tlak za tlakovou mříží.

Schopnost přeměny kinetické energie na energii tlakovou udává difusorová účinnost η_D [-] [2].

$$\eta_D \frac{\Delta p_{stat}}{\frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2)} [-]. \quad (2.21)$$

2.8.2.1 Axiální přetlakové ventilátory

Axiální přetlakové ventilátory se používají v místech, kde teplota dopravované vzdušiny nepřesáhne 100°C. Takovými místy jsou větrací zařízení, klimatizace, chladicí věže, větrání důlních prostorů.

Aerodynamické vlastnosti:

- Tlakové číslo $\psi - 0,2 \div 0,7$
- Průtokové číslo $\phi - 0,12 \div 0,45$
- Celková účinnost $\eta_c - 86\% [1]$.

Tento typ ventilátorů se konstruuje v několika aerodynamických uspořádáních.

- Ventilátor bez statoru
- Ventilátor se vstupními statorovými lopatkami
- Ventilátor se statorem za oběžným kolem
- Ventilátor se statorovými lopatkami před i za oběžným kolem [1,2]

2.8.2.2 Rovnotlakové ventilátory

Jejich použití je výhodné v energetice jako vzduchové či kouřové ventilátory nebo v dolech jako hlavní větrací ventilátory.

Rovnotlakové ventilátory mají vysokou účinnost a pracují při vysokých tlakových číslech. Oproti přetlakovým ventilátorům pro dosažení stejného účinku použijí menší kolo nebo nižší obvodovou rychlost. Potřebují mít slušně navržené difusory, aby kvalitně přeměňovaly kinetickou energii na statický tlak. V oběžném kole získává vzdušina pouze tlak dynamický.

Pojmenování těchto ventilátorů odpovídá skutečnosti, že statické tlaky před kolem a za kolem si jsou rovny. Této rovnosti se dosáhne za předpokladu konstantní rychlosti v lopatkovém kanálu $w = konst.$, takže platí

$$w_1 = w_2 \quad (2.22)$$

ventilátorová rovnice se tedy zjednoduší na tvar

$$\Delta p_{th} = \frac{\rho}{2}(c_2^2 - c_1^2) [Pa]. \quad (2.23)$$

Pro axiální rychlost platí, že konstantní není. Proud vzdušiny se v kole urychlí, za kolem je tedy vyšší než před kolem.

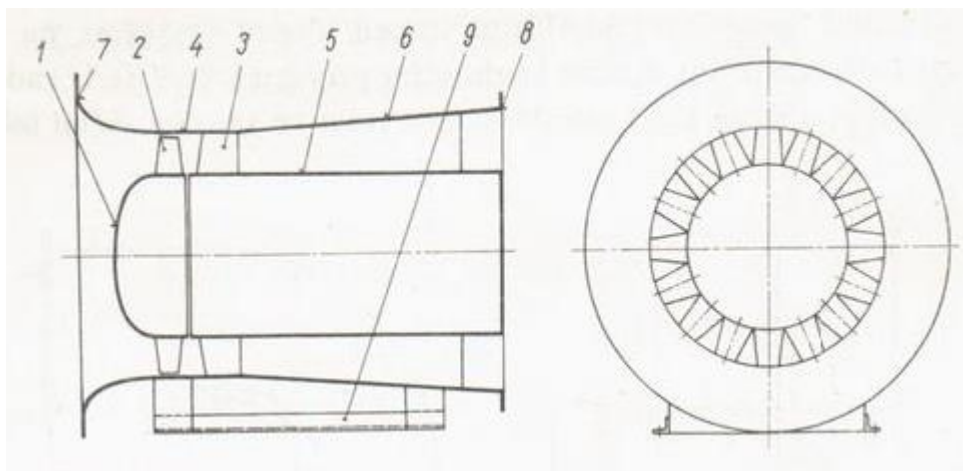
Aerodynamické vlastnosti:

- Tlakové číslo $\psi - 0,7 \div 1,2$
- Průtokové číslo $\phi - 0,25 \div 0,45$
- Celková účinnost $\eta_c - 80\% [1]$.

2.9 Konstrukce ventilátorů

2.9.1 Konstrukce axiálních ventilátorů

Axiální ventilátor (obr. 2.11) se skládá z rotoru, který má oběžné lopatky, a ze statoru, který zajišťuje usměrnění proudu vzduchu. Rotor je v tomto případě oběžné kolo.



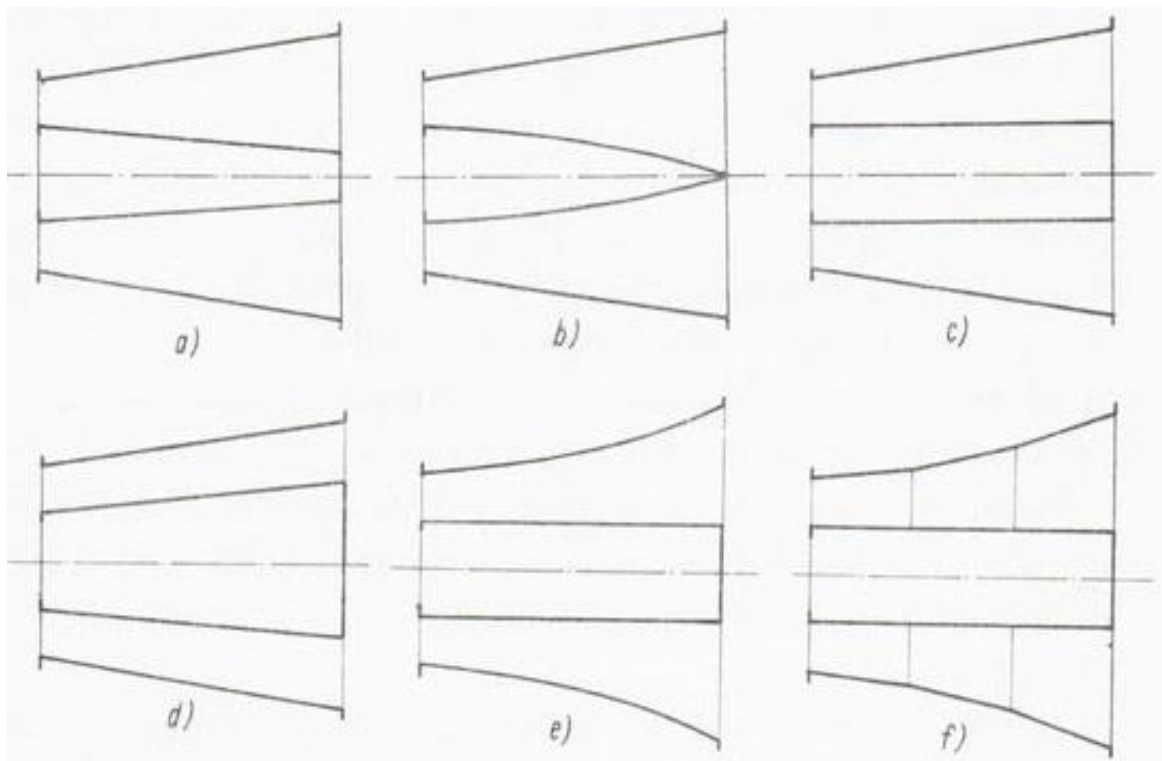
Obr. 2.11 Schéma axiálního ventilátoru [1]

1-nosný náboj oběžného kola, 2-lopatky oběžného kola, 3-rozváděcí lopatky, 4-skříň, 5-jádro difuzoru, 6-plášť difuzoru, 7-sací hrdlo, 8-výtlačné hrdlo, 9-základový rám

Oběžné kolo - součást, které je nutno kontrolovat jak z hlediska aerodynamického tak pevnostního. Během rotace je oběžné kolo namáháno značnými odstředivými silami a zároveň je vystaveno vysokým teplotám, abrazi a korozi. Nejjednodušší oběžné kolo je náboj, který má několik oběžných lopatek. Oběžné kolo může mít přestavitelné lopatky buď za klidu, nebo i během rotace. Podle aerodynamických požadavků se konstruuje tvar náboje [1].

Za oběžné kolo je umístěno rozváděcí ústrojí. Umísťuje se ve směru proudění. Rozváděcí ústrojí usměrňuje proudění, které přichází z oběžného kola, do osového směru s minimálními ztrátami. Rozváděcí ústrojí je tvořeno lopatkovou mříží, která je přišroubována či přivařena do statoru, jak je tomu u přetlakových axiálních ventilátorů. V případě rovnotlakých axiálních ventilátorů je toto ústrojí součástí difuzoru.

Difuzor (obr. 2.12) je potřeba k hospodárnější přeměně energie rychlostní na energii tlakovou. Velké výstupní rychlosti jsou v zařízeních zapojených za ventilátorem nepoužitelné a je potřeba je snížit na přípustnou mez. Difuzory axiálních ventilátorů se odlišují od ostatních ventilátorů známých z ostatních oborů proudění. „Difuzory ventilátorů mají vnitřní jádro, jehož použití je důležité proto, že náboj oběžného kola zaujímá poměrně značnou část z celkové plochy oběžného kola. Je to až 64% a u některých vysokotlakých ventilátorů i více z celkové plochy oběžného kola.“ [1] Nejčastěji se pro výrobu difuzoru používá tvar komolého kužele pro plášť, pro jádro tvar válce. Plášť je s jádrem propojen pomocí soustavy výztuh, které musí přenášet tíhu jádra a aerodynamickou tlakovou sílu [1].



Obr. 2.12 Tvary difusorů[1]

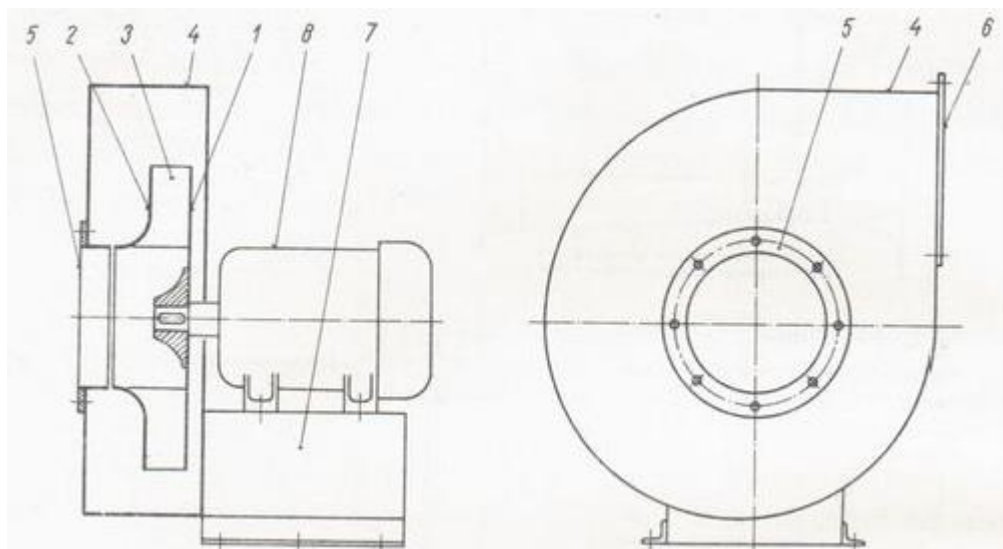
- a - kuželově zužující se jádro, kuželově rozšiřující se plášť*
b- jádro aerodynamického typu, kuželově rozšiřující se plášť
c - válcové jádro, kuželovitě rozšiřující se plášť
d - kuželovitě rozšiřující se jádro, kuželovitě rozšiřující se plášť
e - válcové jádro, exponenciálně rozšiřující se plášť
f - stupňovitý difuzor

Pro připojení ventilátoru k potrubí je potřeba sací komory, kde dochází ke změně směru proudění vzdušiny o 90° . Je důležité co nejvíce dostat podmínky, aby proudění mělo konstantní rychlost a bylo osové na výstupu ze sací komory. Sací komory se, až na výjimky, vyrábějí svařováním. Sací komora je složena z vlastní sací komory a ze sacího ústí. Sací ústí vzdušinu urychluje a vlastní sací komora mění směr proudění.

Aerodynamické regulační ústrojí reguluje průtok ventilátorem pomocí přestavitelných lopatek, tzn. změnou úhlu lopatek. Lopatky lze přestavovat u vstupní satorové lopatkové mříže nebo lopatkové mříže oběžného kola [1].

2.9.2 Konstrukce radiálních ventilátorů

Hlavní část radiálních ventilátorů (obr. 2.13) je oběžné kolo s lopatkami (rotor), které provádí sání a výtlak. Další částí je spirální skříň, která zachycuje vzduch proudící z rotoru a odvádí jej do výtláčného hrdla. Také vytváří tlakovou energii z energie kinetické dopravované látky.

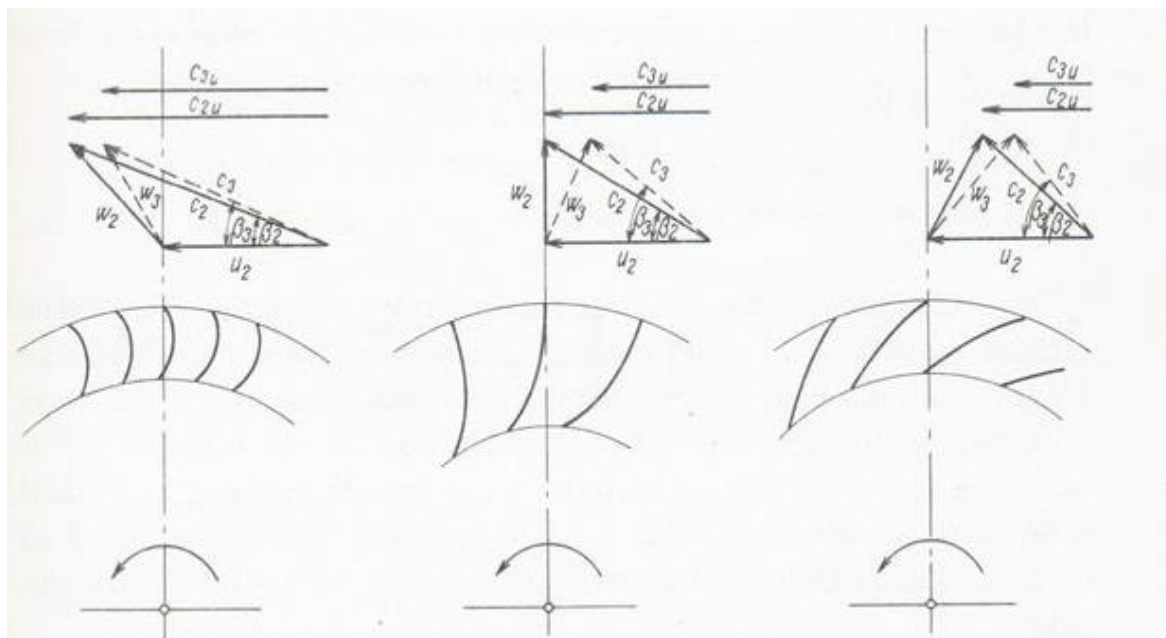


Obr. 2.13 Schéma radiálního ventilátoru [1]

1-nosný kotouč oběžného kola, 2-krycí kotouč oběžného kola, 3-lopátky oběžného kola, 4-spirální skříň, 5-sací hrdlo, 6-výtlačné hrdlo, 7-stolička se základovým rámem, 9-motor

Kritéria pro podělení oběžných kol radiálních ventilátorů jsou:

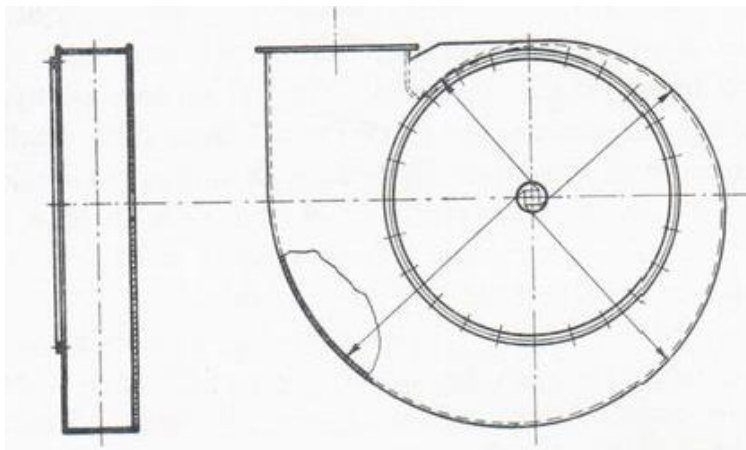
- Zakončení oběžných lopatek (dopředu zahnuté lopatky - $\beta_2 > 90^\circ$, radiálně zahnuté lopatky - $\beta_2 = 90^\circ$, dozadu zahnuté lopatky - $\beta_2 < 90^\circ$), (obr. 2.13)
- Tvar lopatek (profilové, s konstantní tloušťkou)
- Maximální celkový tlak (nízkotlaké, středotlaké, vysokotlaké)
- Provedení oběžného kola (jednostranně sací, oboustranně sací)
- Způsob pohonu a umístění kola na hřídeli
- Smysl otáčení (pravotočivá, levotočivá)



Obr. 2.14 Výstupní trojúhelníky radiálního ventilátoru [1]

Pro radiální ventilátory se nejčastěji používají spirální skříně s paralelními bočnicemi (obr. 2.15) nebo spirální skříně s kruhovým průřezem difuzorové části. Prvně jmenovaná je zhotovená z plechu konstrukční oceli, druhá se vyrábí ze slitin hliníku nebo z plastických hmot [1].

Dvě bočnice a obvodový plech, který má tvar spirály, tvoří spirální skříně s paralelními bočnicemi. Spirální skříně jsou vyráběny rozličnými metodami, jako je svařování (nejvíce používaná technologie, vysokotlaké ventilátory), odlévání (malé vysokotlaké ventilátory), lemové spoje (lehké ventilátory) [1].



Obr. 2.15 Spirální skříně s paralelními bočnicemi [1]

Některé spirální skříně je nutné vyztužovat profilovým materiálem, aby při provozu za vysokých teplot a tlaků nedošlo k poškození. Pro vysoce abrazivní prostředí se konstruuje ventilátory s výměnnými deskami - pancéřováním. Výtlak má průřez čtvercový nebo také obdélníkový. Některé spirální skříně jsou vybaveny kontrolní a revizní otvory, aby bylo možné kontrolovat stav ventilátoru a čistit skříně [1].

Různá šířka je dělicí faktor pro úzké a široké sací komory. Příruba na sání má obvykle průřez obdélníkový. Po sací komoře následuje sací ústí. Mohou být propojené šrouby nebo svařené. Sací komora může obsahovat regulační klapky na vstupu nebo osovou regulaci na výstupu. Jednotlivé lopatky lze ovládat pákami nebo lanky a to ručně nebo pohonem [1].

2.9.3 Společné prvky

Pro ventilátory se používají válcové, osazené nebo duté hřídele. Hřídele musí odolat namáhání v krutu, v ohybu. Všechny součásti je nutné konstruovat s ohledem na kritické otáčky. Hřídele se zpravidla volí podkritické, aby měli pracovní otáčky nižší, než jsou otáčky kritické [1].

Rozměry hřídele a jeho zatížení jsou určující faktory kmitočtu ohybových kmitů. Nastane-li případ rovnosti kmitočtu budící síly a kmitočtu ohybových kmitů, vznikne rezonance. Rezonance je provázána prudkým navýšením amplitudy kmitání. Pokud by byl ventilátor delší dobu v provozu ve stavu rezonance, mohlo by dojít k jeho rychlému poškození a následné havárii, viz kapitola Průvodní jevy. Kritická úhlová rychlost otáčení se vyjádří vztahem

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (2.24)$$

kde $k [Nm^{-1}]$ je tuhost hřídele a $m [kg]$ je hmotnost oběžného kola. Kritická frekvence otáčení je pak

$$n_k = \frac{\omega_k}{2\pi} [s^{-1}]. \quad (2.25)$$

Materiály pro výrobu hřídelů se volí podle způsobu namáhání a použití, určité by se měly použít korozivzdorné.

Z hlediska pružnosti a pevnosti se doporučuje používat hřídele bez výrazných přechodů a osazení. Takovéto konstrukční prvky jsou koncentrátoři napětí a k jejich únavovému poškození je potřeba výrazně menších silových účinků než u hladkých hřídelů.

Pro přenos krouticího momentu z hřídele hnacího na hřídel hnaný se používají hřídelové spojky. Podle konstrukce se spojky dělí na nepružné, pružné, výsuvné, elektromagnetické, hydrodynamické a zvláštní.

K převodu u ventilátorů se hodí klínové řemeny. Kromě nízkých nákladů, nízké hlučnosti a spolehlivosti, lze v určitém rozmezí nastavit libovolný převodový poměr. Což nám umožňuje jedním ventilátorem obsáhnout široké pole působnosti.

K uložení hřídelů můžeme použít jak ložiska valivých, tak kluzných. Valivá ložiska lze rychle vyměnit nebo opravit. Kluzná se upřednostňují hlavně pro nízko otáčkové nebo málo hlučné ventilátory.

Žádnou z těchto částí nelze vybrat nahodile, musí být pečlivě propočítány a zvoleny podle odborné literatury nebo katalogů. Správně vypočítané hodnoty a zvolení součástky přispívá ke správnému fungování ventilátoru, ke snížení jeho poruchovosti a hlavně k vyšší bezpečnosti uživatelů [1].

2.10 Průvodní jevy

Během provozu strojů a zařízení mohou vznikat dynamické síly. V jejich důsledku vzniká kmitání, které je nežádoucí a způsobuje poškození nebo poruchy. Kmitat mohou celé stroje nebo jen jejich části. Ani ventilátory nejsou výjimkou. Proto se v předchozí kapitole zavedl pojem kritická úhlová rychlost ω_k a kritická frekvence n_k . Když stroj dosáhne kritické frekvence a tím se dostane do rezonance, amplitudy kmitů a střídavé zatěžující síly vyvolají až dvacetkrát vyšší deformaci než, kterou lze dosáhnout statickou silou. S dynamickými silami se musí počítat již při konstrukci. K tomu se využívají různé programy, ve kterých se vymodeluje model, nastaví se okrajové podmínky, zatížení a pomocí MKP se vypočítají třeba vzniklá napětí nebo deformace. Z výsledků se určí vhodnost navrženého ventilátoru, nebo jestli se musí změnit nějaké parametry [1].

Nejjednodušší mechanické kmitání je kmitání harmonické, které je popsáno harmonickou křivkou, jako je např. sinusovka. Výchylku s potom udává závislost amplitudy výchylky A_m a úhlového kmitočtu ω . Vztah popisující výchylku v závislosti na čase τ zní

$$s = A_m \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi_0) [m]. \quad (2.26)$$

kde φ_0 je fázový úhel udávající posunutí rovnovážné polohy od počátku soustavy souřadnic. Rychlost v a zrychlení a získáme derivací výchylky za čas, respektive druhou derivací výchylky za čas.

Ke snížení chvění ventilátorů pomáhá vyvažování - snaha ztotožnit osu rotace s hlavní osou setrvačnosti. Vyvažovat se může za klidu (statické) nebo při chodu

(dynamické) na speciálních strojích. Jedná se o komplikovanou záležitost. Závisí na mnoho faktorech, jako jsou fyzikální vlastnosti materiálu, tuhost nebo uložení rotujících součástí.

Podle odchylky osy rotace a hlavní osy setrvačnosti se určuje nevyváženost rotoru

- Statická - osy jsou rovnoběžné
- Dynamická - osy se protínají v těžišti rotoru
- Kvazistatická - osy se protínají v jednom bodě, který není těžištěm
- Obecná - osy jsou mimoběžné

Zvláštní případ nevyváženosti je bludná - vzniká pohybujícím se nevyvážkem, který se při rotaci ustálí v náhodné poloze. Jedná se o součástky nasazené s vůlí.

Další příčiny nevyváženosti vznikají během provozu - ohnutí hřídele, nebo při montáži rotoru.

Maximální přípustné kmity se volí podle tabulek a grafů, které byly získány z provozních zkušeností a zobecněny. Nejdůležitější faktor je vliv kmitání na lidský organismus. Zejména fyzické a psychické zatížení organismu a následně vliv na obsluhu stroje.

Velmi rušivým faktorem pro obsluhu je hluk. Hluk je zvuk působící nepříjemně, rušivě až škodlivě. Hluk ventilátoru nelze ve větší míře předvídat, můžeme jej předvídat za zkušeností s podobně zkonstruovanými stroji. Nejprve se zkoumá vznik zvuku, následně jeho šíření a působení zvuku na lidský sluch. Pro lidský organismus jsou škodlivé zvuky nad 85 dB.

Ke snížení hluku lze přistoupit ze dvou směrů. Buď se sníží hluk ventilátoru, nebo snížení šíření hluku v okolí.

U ventilátorů jsou dva možné zdroje hluku - aerodynamické a mechanické.

Aerodynamické zdroje zvuku vznikají prouděním vzdušiny, nestabilitou mezní vrstvy a celkovou turbulencí. Dále pulsací tlaku rotujících lopatek vznikají zdroje tónových složek tzv. sirénový hluk. Účinky mechanické se projevují pouze při nízkých otáčkách a mechanický hluk vytvářejí chvějící se součásti - ložiska, nevyváženost oběžného kola, uvolněné součásti, špatně navržená konstrukce. Dále se do celkového hluku zahrnuje i hluk od pohonu a převodu. Pro ventilátory se udává hluk:

- Hluk sání nebo hluk výtlaku ventilátoru - hluk vyzařovaný do připojeného potrubí
- Hluk otevřeného sání nebo hluk otevřeného výtlaku - hluk vyzařovaný do okolí
- Hluk v okolí ventilátoru - hluk vyzařovaný do potrubí ze skříně ventilátoru [1].

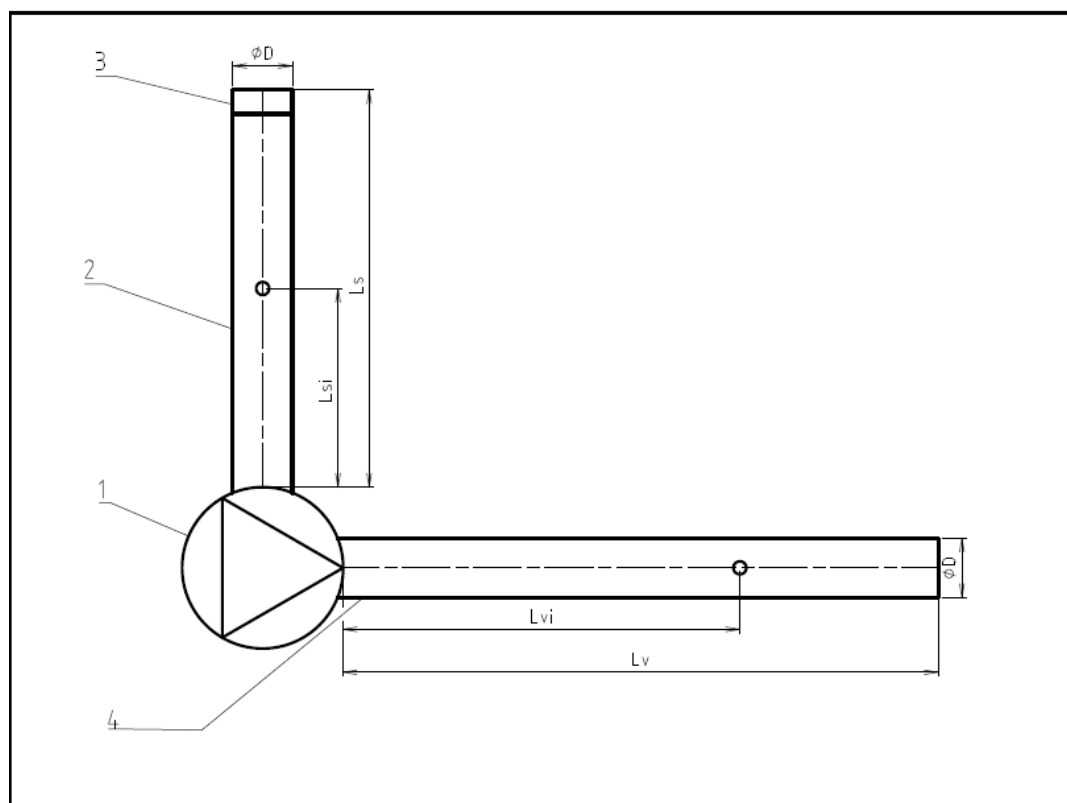
3 Měření ventilátorových charakteristik

Pro zjištění charakteristik nelze použít empirické vzorce, musejí se zjišťovat experimentálně. Jsou důležité, aby uživatel věděl, při jakém nastavení ventilátor pracuje nejlépe a má největší účinnost, jaký pohon je vůbec použitelný.

K měření ventilátorové charakteristiky bylo k dispozici 5 radiálních ventilátorů, které se lišily průměrem oběžného kola D a jeho šířkou b . Jednotlivé geometrie jsou uvedeny v tabulce 3.1. Ventilátory I, II a III dostaly pracovní název „velké“ ventilátory. Ventilátory IV a V. byly pojmenovány „malé“ ventilátory. Kvůli průměru oběžného kola. K určení rychlosti proudícího vzduchu se použil vrtulkový anemometr.

Ke zjištění ventilátorové charakteristiky se zvolila metoda škrcení. Jako škrticí orgán byla použita klapka. Klapka se umístí do potrubní sítě a průtok se reguluje (škrtí) změnou její polohy. Sestavila se měřicí trať podle předchozí kapitoly. Připojil se motor, klapka se nechala otevřená. Do měřicích bodů se umístily měřicí přístroje. Nastavila se frekvence elektromotoru pomocí frekvenčního měniče. Elektromotor se spustil a vše se nechalo ustálit. Změřily se otáčky ventilátoru, teplota, tlak a vlhkost vzduchu v místnosti. Změřil se tlak na sání a tlak na výtlaku. Nakonec se změřila rychlost ve všech měřicích bodech průřezu. Poté se klapka pootočila o 30° a tím se lehce uzavřela. Všechny veličiny se změřily znovu.

Po proměření všech poloh klapky (0° , 30° , 60° , 90°) se změnila frekvence elektromotoru a měření se opakovalo. Po proměření všech frekvencí elektromotoru a všech poloh klapky se měření ukončilo. Tímto způsobem se proměřily všechny poskytnuté ventilátory.



Obr. 3.1 Měřicí trať

1 - ventilátor, 2 - sací potrubí, 3 - škrticí klapka, 4 - výtláčné potrubí

Tlaková charakteristika je závislost tlakového rozdílu na objemovém průtoku ($\Delta p = f(\dot{V})$). Z tohoto důvodu se musí vypočítat objemový průtok. Vztahy

pro výpočet jsou uvedeny v kapitole Rovnice pro vyhodnocení. Dále se určí nebo vypočítá hustota vzduchu ρ , pomocí které se určí hmotnostní průtok vzduchu \dot{M} . Teoretická rychlost c_t je ideální rychlost beze ztrát.

Tab. 3.1 Geometrie měřených ventilátorů

Ventilátor	D [mm]	b [mm]
I	356	30
II	359	55
III	356	54
IV	138	39
V	139	29

3.1 Popis trati

Trať, kde se měřil ventilátor, se skládala ze dvou přímých potrubí, ventilátoru, klapky a asynchronního elektromotoru. Trať byla uspořádána pro měření výtlaku i sání. Sací potrubí mělo délku $L_s=2000$ mm a průměr $\Phi=100$ mm, měřicí bod tlaku byl umístěn $L_{si}=1000$ mm od sacího hrdla ventilátoru. Sací potrubí bylo opatřeno klapkou. Délka výtlačného potrubí byla $L_v=3000$ mm a průměr také $\Phi D=100$ mm, měřicí bod tlaku se nacházel ve vzdálenosti $L_{vi}=2000$ mm od výtlačného hrdla ventilátoru.

K měření se použily dva elektromotory. Elektromotorem 1 se proměřovaly ventilátory I, II a III. Ventilátory IV a V se měřily elektromotorem 2. Parametry použitých asynchronních motorů jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Asynchronní elektromotory s měničem frekvence - parametry

Motor	Výkon	Účinník	Napětí	Frekvence
	P [kW]	$\cos(\varphi)$ [-]	U [V] (Δ/Y)	f [Hz]
1	0,75	0,78	230/400	0-50
2	0,75	0,85	230/400	0-50

3.2 Měřicí přístroje

Tab. 3.3 Použité měřicí přístroje

Přístroj	Označení	Výrobce	Měřená veličina	Jednotka	Měřicí rozsah	Odchylka měření
Anemometr [14]	Testo AQ 104	Testo Limited	Rychlost průtoku	[m/s]	0,4÷60	$\pm(0.2 \text{ m/s} \pm 1\% \text{ z mv})$
Barometr [15]	Testo 512	Testo Limited	Tlak vzduchu	[Pa]	0÷20000	$\pm 0,5\% \text{ z mr}$
Teploměr [16]	Testo 610	Testo Limited	Teplota vzduchu	[°C]	-10÷50	$\pm 0,5^\circ\text{C} \text{ z mv}$
Vlhkoměr [16]	Testo 610	Testo Limited	Relativní vlhkost vzduchu	[%]	0÷100	$\pm 2.5\% \text{ z mv}$
Digitální ruční otáčkoměr [17]	Voltcraft DT-20LK	Voltcraft	Otáčky ventilátoru	[-]	2÷99999	$\pm 0,05\% + \text{jed.}$

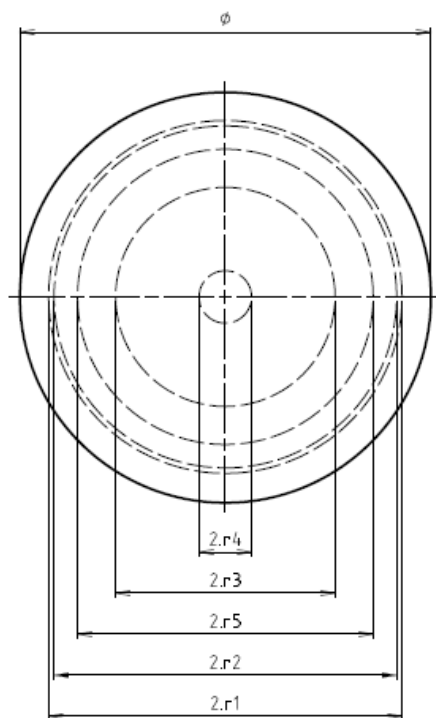
3.3 Tabulky naměřených dat

3.3.1 Polohy měření - měřicí body

Ventilátor jsme měřili v pěti bodech (obr. 3.4), jednotlivé polohy měřicího přístroje jsou zaznamenány v tabulce.

Tab. 3.4 Měřicí body

r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 [mm]	r_4 [mm]	r_5 [mm]
43	41,7	26,7	6,4	36



Obr. 3.2 Měřicí body

3.3.2 Naměřené hodnoty

Tab. 3.5 Podmínky při měření

Ventilátor	Atmosférická teplota	Atmosférická vlhkost	Atmosférický tlak
	t_w [°C]	φ_w [%]	p_a [hPa]
I	19,2	56,2	977
II	19,5	41	977
III	22,2	39,4	978
IV	22,2	39,4	978
V	20,2	46,4	977

3.3.3 Ventilátor I

Tab. 3.6 Ventilátor I - naměřené hodnoty

Otáčky	n [min ⁻¹]	2 855						
Frekvence	f [Hz]	50,0						
Klapka	[°]	0	30	60	90			
Tlak. difference	Δp [Pa]	1 002	1 364	1 853	1 924			
Tlak na sání	p _s [Pa]	-945	-1 322	-1 838	-1 921			
Tlak na výtlaku	p _v [Pa]	57	42	15	3			
Rychlost	c ₁ [m.s ⁻¹]	19,9	17,6	7,8	4,7			
	c ₂ [m.s ⁻¹]	21,9	19,1	8,1	5,3			
	c ₃ [m.s ⁻¹]	24,1	20,6	9,4	5,8			
	c ₄ [m.s ⁻¹]	26,4	22,8	11,0	6,6			
	c ₅ [m.s ⁻¹]	25,6	23,1	11,0	6,7			
n [min ⁻¹]	2 005				1 609			
f [Hz]	34,5				27,5			
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Δp [Pa]	498	664	897	929	319	428	567	588
p _s [Pa]	-467	-643	-892	-927	-298	-414	-563	-587
p _v [Pa]	31	21	5	2	21	14	4	1
c ₁ [m.s ⁻¹]	13,9	11,9	5,3	3,2	11,8	9,2	4,5	2,8
c ₂ [m.s ⁻¹]	16,1	13,3	6,0	3,3	13,2	10,7	4,8	3,0
c ₃ [m.s ⁻¹]	17,8	14,1	6,9	4,0	14,2	11,4	5,5	3,3
c ₄ [m.s ⁻¹]	19,3	15,8	7,6	4,6	15,5	12,6	6,3	3,7
c ₅ [m.s ⁻¹]	19,4	14,6	7,6	4,6	15,8	12,4	6,1	3,7
n [min ⁻¹]	1 207				595			
f [Hz]	20,5				10,0			
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Δp [Pa]	175	242	314	327	41	55	73	76
p _s [Pa]	-165	-235	-313	-327	-37	-53	-73	-76
p _v [Pa]	10	7	1	0	4	2	0	0
c ₁ [m.s ⁻¹]	9,0	7,7	3,3	1,8	4,6	3,7	1,5	0,9
c ₂ [m.s ⁻¹]	9,8	8,1	3,6	2,0	5,0	4,0	1,8	1,1
c ₃ [m.s ⁻¹]	10,7	8,8	4,1	2,2	5,3	4,4	2,0	1,4
c ₄ [m.s ⁻¹]	11,5	9,4	4,6	2,8	5,8	4,8	2,3	1,4
c ₅ [m.s ⁻¹]	11,8	9,2	4,5	2,6	5,7	4,7	2,2	1,3

3.3.4 Ventilátor II

Tab. 3.7 Ventilátor II - naměřené hodnoty

Otáčky	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 869						
Frekvence	$f \text{ [Hz]}$	50,0						
Klapka	$[\circ]$	0	30	60	90			
Tlak. difference	$\Delta p \text{ [Pa]}$	425	598	982	1 235			
Tlak na sání	$p_s \text{ [Pa]}$	-400	-576	-979	-1 233			
Tlak na výtlaku	$p_v \text{ [Pa]}$	25	22	3	2			
Rychlost	$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	7,4	5,2	4,5	2,5			
	$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	10,3	7,7	4,7	2,7			
	$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	12,5	9,7	5,1	2,8			
	$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	13,4	9,1	5,2	3,0			
	$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	13,9	10,0	5,5	3,1			
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 009				1 611			
$f \text{ [Hz]}$	34,0				27,5			
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90
$\Delta p \text{ [Pa]}$	197	277	442	581	129	175	302	385
$p_s \text{ [Pa]}$	-182	-266	-439	-579	-117	-166	-298	-382
$p_v \text{ [Pa]}$	15	11	3	2	12	9	4	3
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,6	3,1	3,0	2,1	3,8	2,2	2,2	1,9
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	8,0	4,4	3,2	2,1	5,2	3,5	2,5	2,0
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	8,9	5,8	3,5	2,0	6,7	5,0	2,6	1,7
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	9,6	7,2	3,8	2,0	6,9	5,8	2,9	1,7
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	10,3	8,4	3,9	2,1	7,3	6,6	3,0	1,8
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	1 208				595			
$f \text{ [Hz]}$	20,5				10,0			
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90
$\Delta p \text{ [Pa]}$	71	98	172	220	18	24	42	52
$p_s \text{ [Pa]}$	-63	-91	-168	-217	-14	-20	-39	-47
$p_v \text{ [Pa]}$	8	7	4	3	4	4	3	5
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	4,2	1,9	2,0	1,3	2,1	2,0	1,4	0,5
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	4,9	3,0	2,0	1,7	2,4	2,2	1,5	0,6
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,5	3,7	2,1	1,4	2,6	2,2	1,3	0,7
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,2	4,2	2,1	1,4	2,7	2,2	1,1	0,6
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,6	5,0	2,2	1,3	2,8	2,2	1,1	0,7

3.3.5 Ventilátor III

Tab. 3.8 Ventilátor III - naměřené hodnoty

Otáčky	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 877						
Frekvence	$f \text{ [Hz]}$	55,0						
Klapka	$[\circ]$	0	30	60	90			
Tlak. difference	$\Delta p \text{ [Pa]}$	472	670	1 078	1 293			
Tlak na sání	$p_s \text{ [Pa]}$	-442	-650	-1 074	-1 290			
Tlak na výtlaku	$p_v \text{ [Pa]}$	30	20	4	3			
Rychlost	$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	11,0	8,1	4,8	3,0			
	$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	12,6	10,3	5,1	3,3			
	$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	14,0	11,0	5,4	3,3			
	$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	14,9	12,5	5,8	3,6			
	$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	16,1	13,4	6,3	3,6			
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 010				1 613			
$f \text{ [Hz]}$	34,5				27,5			
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90
$\Delta p \text{ [Pa]}$	223	307	518	620	142	202	327	399
$p_s \text{ [Pa]}$	-205	-295	-515	-618	-130	-194	-323	-397
$p_v \text{ [Pa]}$	18	12	3	2	12	8	4	2
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,9	6,6	3,6	2,2	6,2	4,6	2,8	1,6
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	8,8	7,2	3,7	2,3	7,1	5,7	2,9	1,9
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	9,9	8,3	3,7	2,3	7,7	6,4	3,1	2,0
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	10,5	9,0	4,1	2,5	8,3	7,4	3,5	2,1
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	11,1	10,0	4,3	2,6	9,1	7,7	3,4	2,2
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	1 203				593			
$f \text{ [Hz]}$	20,3				10,0			
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90
$\Delta p \text{ [Pa]}$	75	110	175	215	19	27	43	54
$p_s \text{ [Pa]}$	-67	-104	-172	-212	-15	-23	-40	-51
$p_v \text{ [Pa]}$	8	6	3	3	4	4	3	3
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	4,0	3,3	2,1	1,5	2,3	1,2	1,3	0,6
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,0	4,1	2,2	1,5	2,5	1,7	1,3	0,6
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,7	4,5	2,3	1,5	2,7	2,0	1,3	0,7
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,1	5,0	2,6	1,4	3,0	1,9	1,3	0,7
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,3	5,6	2,6	1,5	3,2	2,9	1,3	0,8

3.3.6 Ventilátor IV

Tab. 3.9 Ventilátor IV - naměřené hodnoty

Otáčky	n [min^{-1}]	2 953							
Frekvence	f [Hz]	50,0							
Klapka	$[\circ]$	0	30	60	90				
Tlak. difference	Δp [Pa]	94	153	282	350				
Tlak na sání	p_s [Pa]	-87	-147	-280	-349				
Tlak na výtlaku	p_v [Pa]	7	6	2	1				
Rychlost	c_1 [m.s^{-1}]	7,4	6,4	3,5	2,2				
	c_2 [m.s^{-1}]	7,4	6,7	3,7	2,2				
	c_3 [m.s^{-1}]	8,1	7,4	4,2	2,4				
	c_4 [m.s^{-1}]	9,1	8,2	4,6	2,5				
	c_5 [m.s^{-1}]	9,1	8,2	4,5	2,7				
n [min^{-1}]	2 008				1 614				
f [Hz]	33,8				27,2				
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90	
Δp [Pa]	43	73	127	160	29	46	83	102	
p_s [Pa]	-38	-68	-126	-159	-27	-44	-83	-102	
p_v [Pa]	5	5	1	1	2	2	0	0	
c_1 [m.s^{-1}]	4,4	4,0	2,2	1,5	3,2	3,2	1,3	1,0	
c_2 [m.s^{-1}]	4,8	4,2	2,4	1,6	3,7	3,7	1,7	1,2	
c_3 [m.s^{-1}]	5,5	5,2	2,8	1,6	4,4	4,2	2,1	2,1	
c_4 [m.s^{-1}]	6,2	5,5	3,0	1,7	5,0	4,5	2,4	1,5	
c_5 [m.s^{-1}]	6,1	5,4	3,1	1,8	4,7	4,4	2,3	1,5	
n [min^{-1}]	1 205				594				
f [Hz]	20,3				10,0				
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90	
Δp [Pa]	16	25	45	56	4	6	11	13	
p_s [Pa]	-15	-24	-45	-55	-3	-5	-11	-13	
p_v [Pa]	1	1	0	1	1	1	0	0	
c_1 [m.s^{-1}]	2,4	2,2	1,3	0,7	1,2	1,2	0,5	0,0	
c_2 [m.s^{-1}]	2,8	2,5	1,4	0,8	1,3	1,3	0,6	0,0	
c_3 [m.s^{-1}]	3,2	3,0	1,5	0,9	1,5	1,5	0,8	0,5	
c_4 [m.s^{-1}]	3,7	3,4	1,8	1,1	1,9	1,6	0,9	0,6	
c_5 [m.s^{-1}]	3,6	3,6	1,8	1,0	1,7	1,6	0,9	0,0	

3.3.7 Ventilátor V

Tab. 3.10 Ventilátor V - naměřené hodnoty

Otáčky	$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 955							
Frekvence	$f \text{ [Hz]}$	50,0							
Klapka	$[\circ]$	0	30	60	90				
Tlak. difference	$\Delta p \text{ [Pa]}$	89	138	247	293				
Tlak na sání	$p_s \text{ [Pa]}$	-82	-132	-245	-293				
Tlak na výtlaku	$p_v \text{ [Pa]}$	7	6	2	0				
Rychlost	$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,8	6,0	3,2	3,1				
	$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,9	6,5	3,4	3,5				
	$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	7,2	7,0	3,7	2,3				
	$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	8,8	8,0	4,3	2,4				
	$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	8,7	8,0	4,2	3,0				
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	2 008				1 608				
$f \text{ [Hz]}$	33,8				27,0				
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90	
$\Delta p \text{ [Pa]}$	39	62	112	130	24	38	70	83	
$p_s \text{ [Pa]}$	-37	-60	-112	-130	-22	-35	-70	-83	
$p_v \text{ [Pa]}$	2	2	0	0	2	3	0	0	
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	4,0	3,7	4,0	4,4	3,3	3,0	1,3	1,0	
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	4,4	4,1	2,3	5,1	3,7	3,3	1,6	1,1	
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	5,4	5,2	2,7	1,8	4,4	4,1	2,3	1,5	
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,1	5,5	2,8	1,6	5,0	4,2	2,3	1,3	
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	6,4	5,9	2,8	3,3	4,8	4,4	3,5	1,3	
$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	1 204				595				
$f \text{ [Hz]}$	20,3				10,0				
$[\circ]$	0	30	60	90	0	30	60	90	
$\Delta p \text{ [Pa]}$	13	22	39	46	2	4	8	10	
$p_s \text{ [Pa]}$	-12	-21	-38	-46	-1	-4	-8	-10	
$p_v \text{ [Pa]}$	1	1	1	0	1	0	0	0	
$c_1 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	2,4	2,5	1,4	0,8	1,3	1,1	4,7	0,0	
$c_2 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	2,9	2,7	1,4	0,9	1,4	1,4	2,7	0,0	
$c_3 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	3,1	3,0	1,6	1,0	1,7	1,5	0,8	0,5	
$c_4 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	3,7	3,3	1,8	1,0	1,8	1,6	0,9	0,5	
$c_5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	3,6	3,1	1,7	0,9	1,7	1,5	0,9	0,0	

3.4 Rovnice pro vyhodnocení

- Střední rychlost $c_{stř}$

$$c_{stř} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \Delta S_i} [m/s], \quad (3.1)$$

kde c [m/s] je rychlost v daném bodě měření a ΔS [m²] je přírůstek plochy.

- Objemový průtok \dot{V}

$$\dot{V} = c_{stř} \cdot S [m^3/s], \quad (3.2)$$

kde S [m²] je celková průtočná plocha.

- Hmotnostní průtok \dot{M}

$$\dot{M} = c_{stř} \cdot S \cdot \rho [kg/s], \quad (3.3)$$

kde ρ [kg/m³] je hustota vzduchu.

- Teoretická rychlost w_t

$$c_t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} [m/s], \quad (3.4)$$

kde Δp [Pa] je naměřený tlakový rozdíl mezi ventilátorem a měřeným bodem. Při výpočtu teoretické rychlosti se vychází z Bernoulliho rovnice (2.2) beze ztrát, tedy ze zákona zachování energie. Tato forma Bernoulliho rovnice popisuje 1-D proudění. Protože oba měřicí body ležely ve stejné výšce, je možné zanedbat členy popisující potenciální energii.

- Tlaková difference Δp

$$\Delta p = p_v - p_s [Pa], \quad (3.5)$$

kde p_v [Pa] je tlak na výtlaku a p_s [Pa] je tlak na sání.

3.5 Vyhodnocení naměřených dat

Nejprve se stanoví hustota vzduchu, k jejímu učení se využije např. program *Vlhký vzduch* 3.0. [9]

Tab. 3.11 Hustota vzduchu při měření

Ventilátor		I	II	III	IV	V
Hustota	ρ [kg.m ⁻³]	1,1583	1,1586	1,1474	1,1474	1,1551

Pro výpočet střední rychlosti je nutné vypočítat přírůstky plochy pro jednotlivé měřicí body.

Tab. 3.12 Přírůstky plochy

Měřicí bod	i	0	1	2	3	4	5
Přírůstek plochy	ΔS_i [mm ²]	2 045	345,9	1 391	2 111	128,7	1 832

3.5.1 Vzorový výpočet

Pro názornost je zde uveden vzorový výpočet jednotlivých veličin. Ukázky výpočtů jsou pro ventilátor I při frekvenci $f=50$ Hz a pro otevřenou klapku. Hodnoty jsou v tabulce 3.6 Ventilátor I - naměřené hodnoty.

$c_1 = 19,9 \text{ m.s}^{-1}$	$\Delta S_0 = 2\,045 \text{ mm}^2$	$\rho_1 = 1,1583 \text{ kg.m}^{-3}$
$c_2 = 21,9 \text{ m.s}^{-1}$	$\Delta S_1 = 345,9 \text{ mm}^2$	$\Delta p = 1\,002 \text{ Pa}$
$c_3 = 24,1 \text{ m.s}^{-1}$	$\Delta S_2 = 1\,391 \text{ mm}^2$	
$c_4 = 26,4 \text{ m.s}^{-1}$	$\Delta S_3 = 2\,111 \text{ mm}^2$	
$c_5 = 25,6 \text{ m.s}^{-1}$	$\Delta S_4 = 128,7 \text{ mm}^2$	
	$\Delta S_5 = 1\,832 \text{ mm}^2$	

- Výpočet střední rychlosti

$$c_{stř} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \Delta S_i} = \frac{c_1 \cdot \Delta S_1 + c_2 \cdot \Delta S_2 + c_3 \cdot \Delta S_3 + c_4 \cdot \Delta S_4 + c_5 \cdot \Delta S_5}{\Delta S_0 + \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 + \Delta S_5}$$

$$c_{stř} = \frac{19,9 \cdot 345,9 + 21,9 \cdot 1391 + 24,1 \cdot 2111 + 26,4 \cdot 128,7 + 25,6 \cdot 1832}{2045 + 345,9 + 1391 + 2111 + 128,7 + 1832} \text{ m/s}$$

$$c_{stř} = 17,638 \text{ m/s}$$

- Výpočet objemového průtoku

$$\dot{V} = c_{stř} \cdot S = c_{stř} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 17,638 \cdot \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Výpočet hmotnostního průtoku

$$\dot{M} = c_{stř} \cdot S \cdot \rho = c_{stř} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho = 17,638 \cdot \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot 1,1583 \text{ kg/s}$$

$$\dot{M} = 0,160 \text{ kg/s}$$

- Výpočet teoretické rychlosti

$$c_t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1002}{1,1583}} \text{ m/s}$$

$$c_t = 41,595 \text{ m/s}$$

Tímto způsobem se vypočítají všechny hodnoty, výsledky jsou zapsány v tabulkách, které jsou v této kapitole.

3.5.2 Ventilátor I

Tab. 3.13 Ventilátor I - vypočítané hodnoty

Frekvence	f [Hz]	50							
Klapka	[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Střední rychlost	$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	17,638	15,457	7,051	4,376				
Objemový průtok	\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,139	0,121	0,055	0,034				
Hmotnostní průtok	\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,160	0,141	0,064	0,040				
Teoretická rychlost	c_t [m.s ⁻¹]	41,595	48,530	56,564	57,638				
f [Hz]	34,5				27,5				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	13,090	10,334	5,048	2,949	10,614	8,464	4,053	2,465	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,103	0,081	0,040	0,023	0,083	0,066	0,032	0,019	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,119	0,094	0,046	0,027	0,097	0,077	0,037	0,022	
c_t [m.s ⁻¹]	29,324	33,860	39,355	40,051	23,469	27,185	31,289	31,863	
f [Hz]	20,5				10				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	7,949	6,439	3,010	1,677	3,937	3,229	1,473	0,937	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,062	0,051	0,024	0,013	0,031	0,025	0,012	0,007	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,072	0,059	0,027	0,015	0,036	0,029	0,013	0,009	
c_t [m.s ⁻¹]	17,383	20,441	23,285	23,762	8,414	9,745	11,227	11,455	

3.5.3 Ventilátor II

Tab. 3.14 Ventilátor II - vypočítané hodnoty

Frekvence	f [Hz]	50							
Klapka	[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Střední rychlost	$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	8,972	6,682	3,770	2,113				
Objemový průtok	\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,070	0,052	0,030	0,017				
Hmotnostní průtok	\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,082	0,061	0,034	0,019				
Teoretická rychlost	c_t [m.s ⁻¹]	27,086	32,129	41,172	46,172				
f [Hz]	34,5				27,5				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	6,660	4,552	2,612	1,525	4,705	3,695	1,986	1,343	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,052	0,036	0,021	0,012	0,037	0,029	0,016	0,011	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,061	0,041	0,024	0,014	0,043	0,034	0,018	0,012	
c_t [m.s ⁻¹]	18,441	21,867	27,622	31,669	14,923	17,381	22,832	25,780	
f [Hz]	20,5				10				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	3,923	2,845	1,554	1,061	1,914	1,618	0,951	0,490	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,031	0,022	0,012	0,008	0,015	0,013	0,007	0,004	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,036	0,026	0,014	0,010	0,017	0,015	0,009	0,004	
c_t [m.s ⁻¹]	11,071	13,007	17,231	19,488	5,574	6,437	8,515	9,474	

3.5.4 Ventilátor III

Tab. 3.15 Ventilátor III - vypočítané hodnoty

Frekvence	f [Hz]	50							
Klapka	[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Sřední rychlost	$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	10,479	8,468	4,131	2,502				
Objemový průtok	\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,082	0,067	0,032	0,020				
Hmotnostní průtok	\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,094	0,076	0,037	0,023				
Teoretická rychlost	c_t [m.s ⁻¹]	28,683	34,174	43,348	47,474				
f [Hz]	34,5				27,5				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	7,285	6,277	2,879	1,770	5,859	4,850	2,321	1,492	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,057	0,049	0,023	0,014	0,046	0,038	0,018	0,012	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,066	0,057	0,026	0,016	0,053	0,044	0,021	0,013	
c_t [m.s ⁻¹]	19,716	23,133	30,048	32,874	15,733	18,764	23,874	26,372	
f [Hz]	20,5				10				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	4,163	3,469	1,749	1,108	2,065	1,599	0,961	0,519	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,033	0,027	0,014	0,009	0,016	0,013	0,008	0,004	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,038	0,031	0,016	0,010	0,019	0,014	0,009	0,005	
c_t [m.s ⁻¹]	11,434	13,847	17,465	19,359	5,755	6,860	8,657	9,702	

3.5.5 Ventilátor IV

Tab. 3.16 Ventilátor IV - vypočítané hodnoty

Frekvence	f [Hz]	50							
Klapka	[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
Sřední rychlost	$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	6,086	5,505	3,064	1,802				
Objemový průtok	\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,048	0,043	0,024	0,014				
Hmotnostní průtok	\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,055	0,050	0,028	0,016				
Teoretická rychlost	c_t [m.s ⁻¹]	12,800	16,331	22,171	24,700				
f [Hz]	34,5				27,5				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	4,047	3,668	2,047	1,227	3,157	3,025	1,499	1,196	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,032	0,029	0,016	0,010	0,025	0,024	0,012	0,009	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,036	0,033	0,018	0,011	0,028	0,027	0,014	0,011	
c_t [m.s ⁻¹]	8,657	11,280	14,879	16,700	7,110	8,954	12,028	13,334	
f [Hz]	20,5				10				
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90	
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	2,362	2,242	1,158	0,666	1,114	1,086	0,568	0,144	
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,019	0,018	0,009	0,005	0,009	0,009	0,004	0,001	
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,021	0,020	0,010	0,006	0,010	0,010	0,005	0,001	
c_t [m.s ⁻¹]	5,281	6,601	8,857	9,880	2,641	3,234	4,379	4,760	

3.5.6 Ventilátor V

Tab. 3.17 Ventilátor V - vypočítané hodnoty

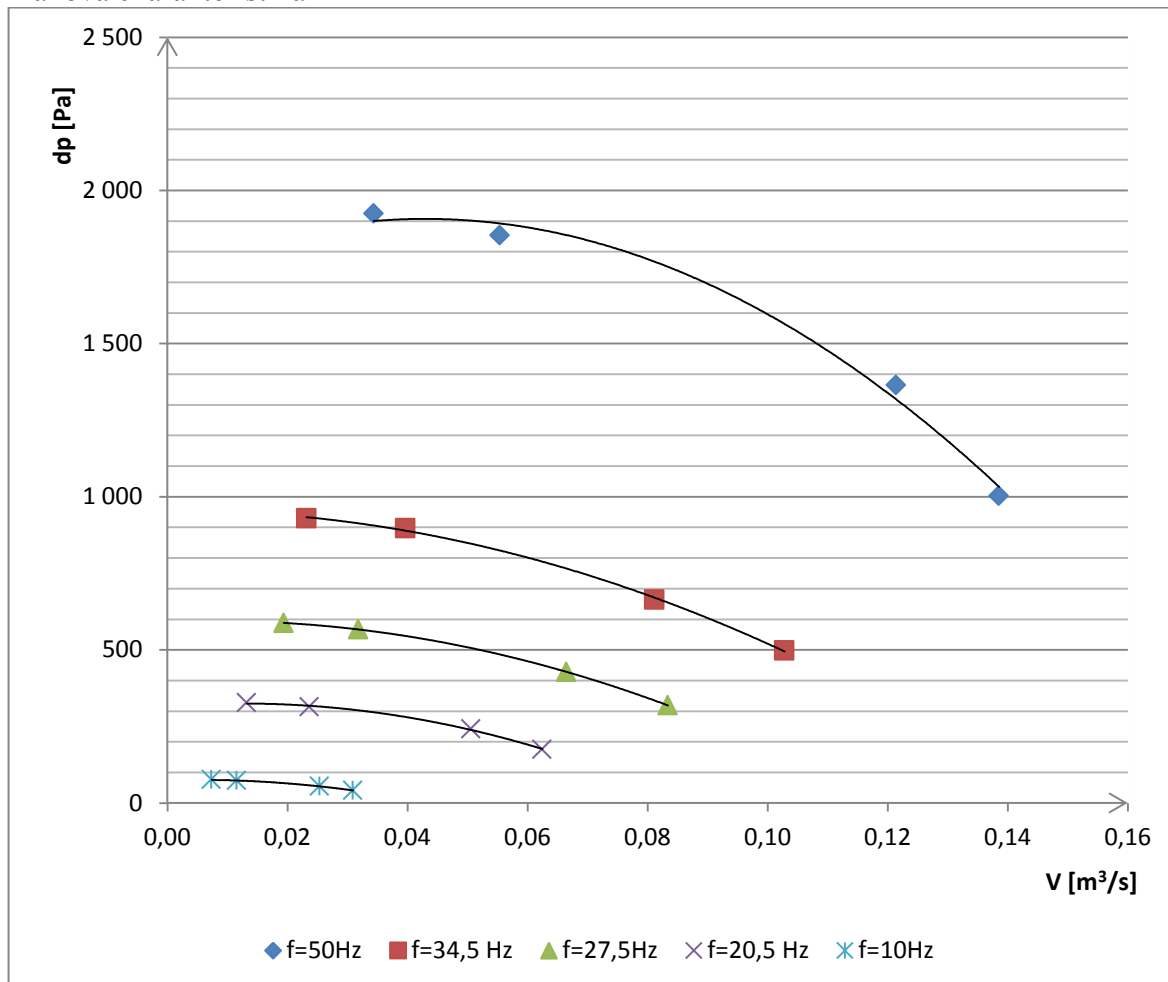
Frekvence	f [Hz]	50						
Klapka	[°]	0	30	60	90			
Střední rychlost	$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	5,631	5,294	2,788	2,114			
Objemový průtok	\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,044	0,042	0,022	0,017			
Hmotnostní průtok	\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,051	0,048	0,025	0,019			
Teoretická rychlost	c_t [m.s ⁻¹]	12,414	15,458	20,680	22,524			
f [Hz]	34,5				27,5			
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	4,000	3,753	2,008	2,377	3,185	2,914	1,813	0,967
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,031	0,029	0,016	0,019	0,025	0,023	0,014	0,008
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,036	0,034	0,018	0,022	0,029	0,026	0,016	0,009
c_t [m.s ⁻¹]	8,217	10,361	13,926	15,003	6,446	8,111	11,009	11,988
f [Hz]	20,5				10			
[°]	0	30	60	90	0	30	60	90
$c_{stř}$ [m.s ⁻¹]	2,353	2,172	1,166	0,690	1,188	1,076	1,125	0,143
\dot{V} [m ³ .s ⁻¹]	0,018	0,017	0,009	0,005	0,009	0,008	0,009	0,001
\dot{M} [kg.s ⁻¹]	0,021	0,020	0,011	0,006	0,011	0,010	0,010	0,001
c_t [m.s ⁻¹]	4,744	6,172	8,217	8,925	1,861	2,632	3,722	4,161

Značné rozdíly mezi střední rychlostí $c_{stř}$ (vypočítanou z naměřených rychlostí c_i) a teoretickou rychlostí c_t (určenou z tlakové difference) jsou způsobeny ztrátami. Rozlišují se ztráty délkové a místní. V tomto měření se projeví oba druhy. Délkové ztráty vznikly v potrubí kvůli tření. Místní ztráty se vytvářejí v okolí klapky a ventilátoru. Ve ventilátoru vznikají objemové ztráty (netěsnost), kotoučové ztráty vlivem tření krycího a nosného kotouče o vzduch. Ke snížení rychlosti může svou měrou přispívat i elektromotor.

3.6 Naměřené charakteristiky

3.6.1 Ventilátor I

Tlaková charakteristika

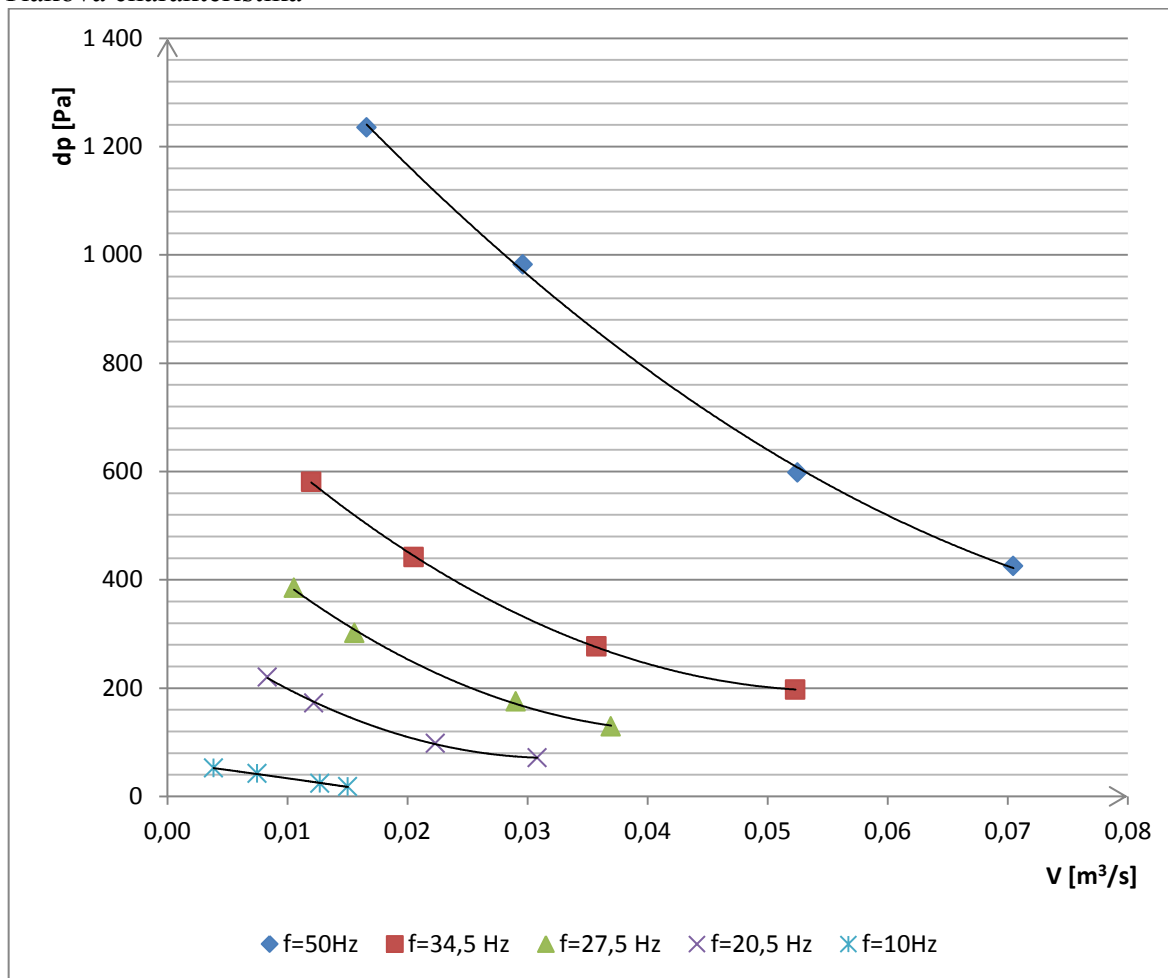


Obr. 3.3 Charakteristika ventilátoru I

Z obr. 3.5 je patrné, že nejvyšší objemový průtok ventilátoru I byl při frekvenci 50 Hz a při plně otevřené klapce, jeho hodnota byla $\dot{V} = 0,139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro tuto frekvenci byl tento bod s nejnižší tlakovou diferencí o hodnotě $\Delta p = 1002 \text{ Pa}$. Škrčením se postupně snižovala hodnota průtoku. Současně se snižováním průtoku rostla hodnota tlakové difference. Naměřené hodnoty bylo možné proložit parabolou, což je potvrzení teoretického předpokladu (kap. 3.1). Snižováním frekvence elektroměru se snižovaly i otáčky ventilátoru. Klesala střední rychlost a tím klesal i objemový průtok. Tendence změny průtoku a tlakové difference byly pro jednotlivé frekvence podobné jako pro frekvenci 50 Hz. Naměřené hodnoty vytvářely parabolu. Snižování frekvence způsobilo posouvání parabol blíže k počátku soustavy souřadnic. Tento posun je rovnoměrný, větší odstup mezi $f=50 \text{ Hz}$ a $f=34,5 \text{ Hz}$ je způsoben větším rozdílem frekvencí.

3.6.2 Ventilátor II

Tlaková charakteristika



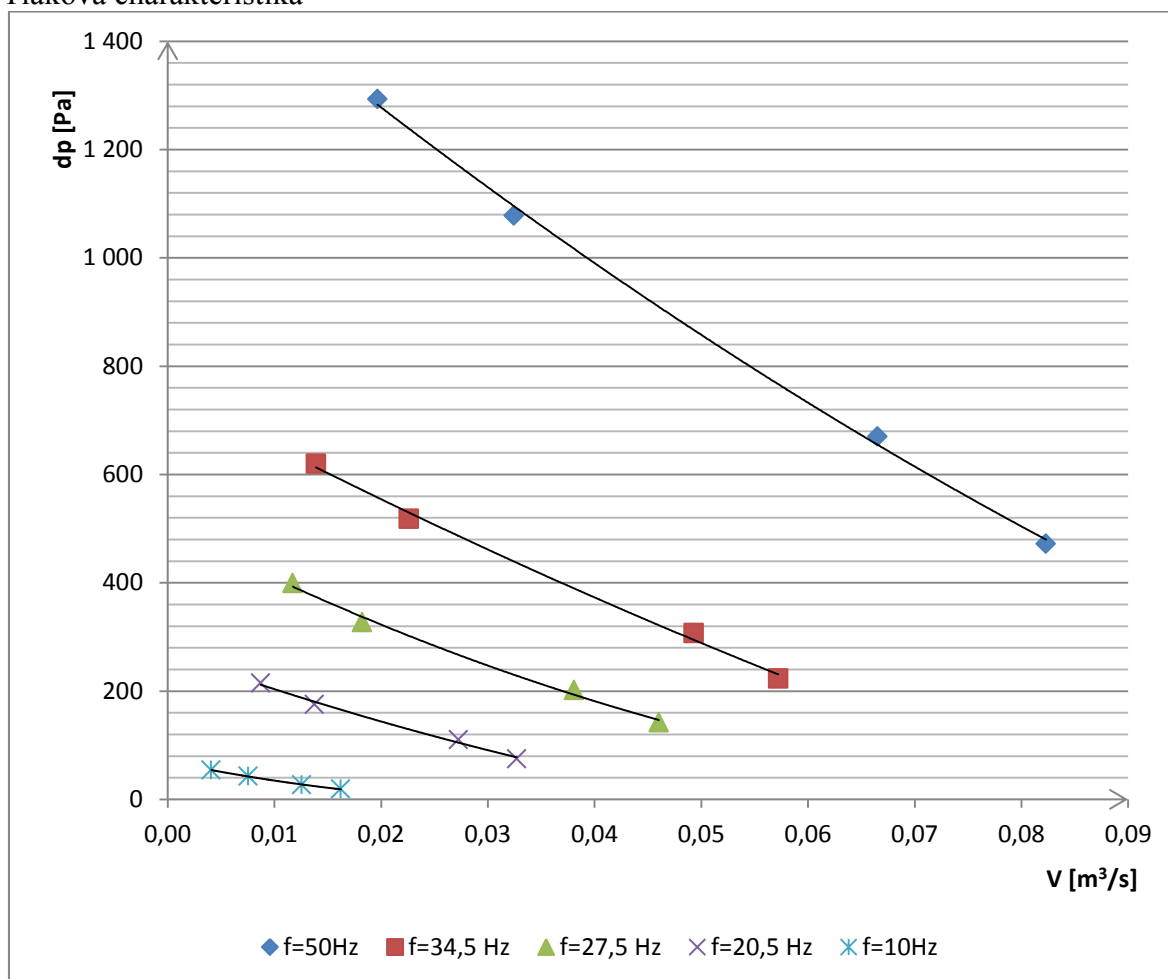
Obr. 3.4 Charakteristika ventilátoru II

Ventilátor II měl podobnou velikost oběžného kola, které bylo o 3mm větší, zároveň byl o 25mm širší. Jeho charakteristika se od charakteristiky předchozího ventilátoru liší. Neliší se tvarem, ale hodnotami. Nejvyšší dosažený průtok vzduchu byl téměř o polovinu menší $\dot{V} = 0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tlaková diference se lišila také skoro o polovinu $\Delta p = 425 \text{ Pa}$. I v tomto případě body vytvářely parabolu, která by ale měla být konkávní a ne konvexní. Paraboly mají určitou vzájemnou podobnost.

Porovnání s ventilátorem I ukazuje, že se při změně geometrie se mění hodnoty jednotlivých veličin. V tomto případě se zvětšila šířka oběžného kola a tím i průtokový kanál. Ventilátor II má nižší hodnoty v jednotlivých bodech měření. Změnou šířky kola o 25 mm se hodnoty všech veličin o polovinu zmenšily. Což je patrné z obrázků jednotlivých charakteristik.

3.6.3 Ventilátor III

Tlaková charakteristika



Obr. 3.5 Charakteristika ventilátoru III

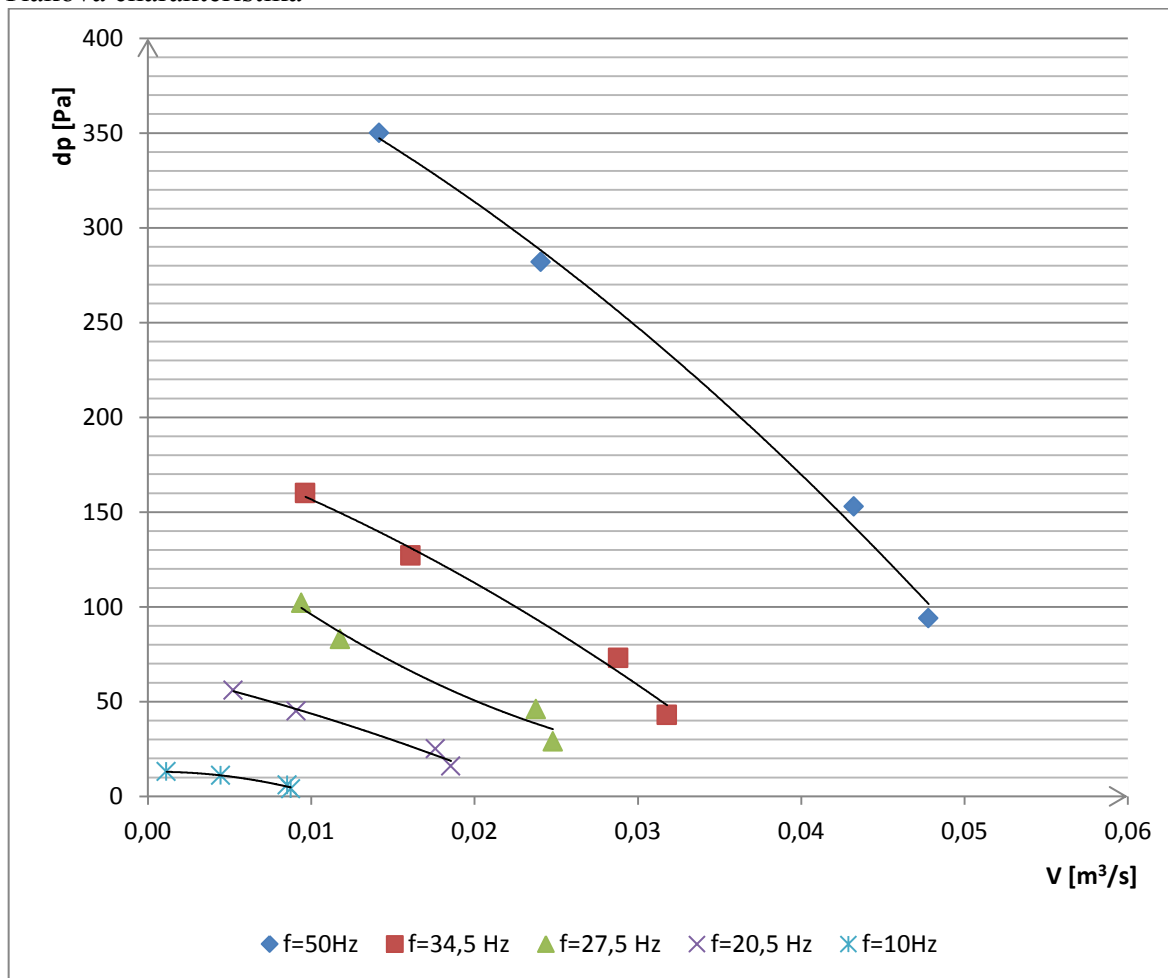
Ventilátor III je poslední „velký ventilátor“, který byl měřen. Šířka oběžného kola byla stejná jako u ventilátoru I, šířku oběžného kola měl totožnou jako ventilátor II. Nejvyšší dosažený průtok byl nepatrně větší než u ventilátoru II $\dot{V} = 0,082 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tlaková difference v tomto bodě byla také větší a to $\Delta p = 472 \text{ Pa}$. Charakteristiky tohoto ventilátoru jsou velmi rozložené paraboly, které při malém zmenšené, mohou připomínat přímky.

Pro geometricky podobné ventilátory by naměřené i vypočítané hodnoty měly být téměř stejné. Což se měřením potvrdilo. Ventilátor II a III mají velmi podobné hodnoty. V jednotlivých bodech měření má ventilátor III nepatrně vyšší hodnotu střední rychlosti (a tím i průtoku) než ventilátor II. Tlaková difference se liší o 10 až 30 Pa.

Při porovnání s ventilátorem I můžeme dojít ke stejným závěrům jako u ventilátoru II. I v tomto případě změna geometrie způsobila pokles hodnot.

3.6.4 Ventilátor IV

Tlaková charakteristika

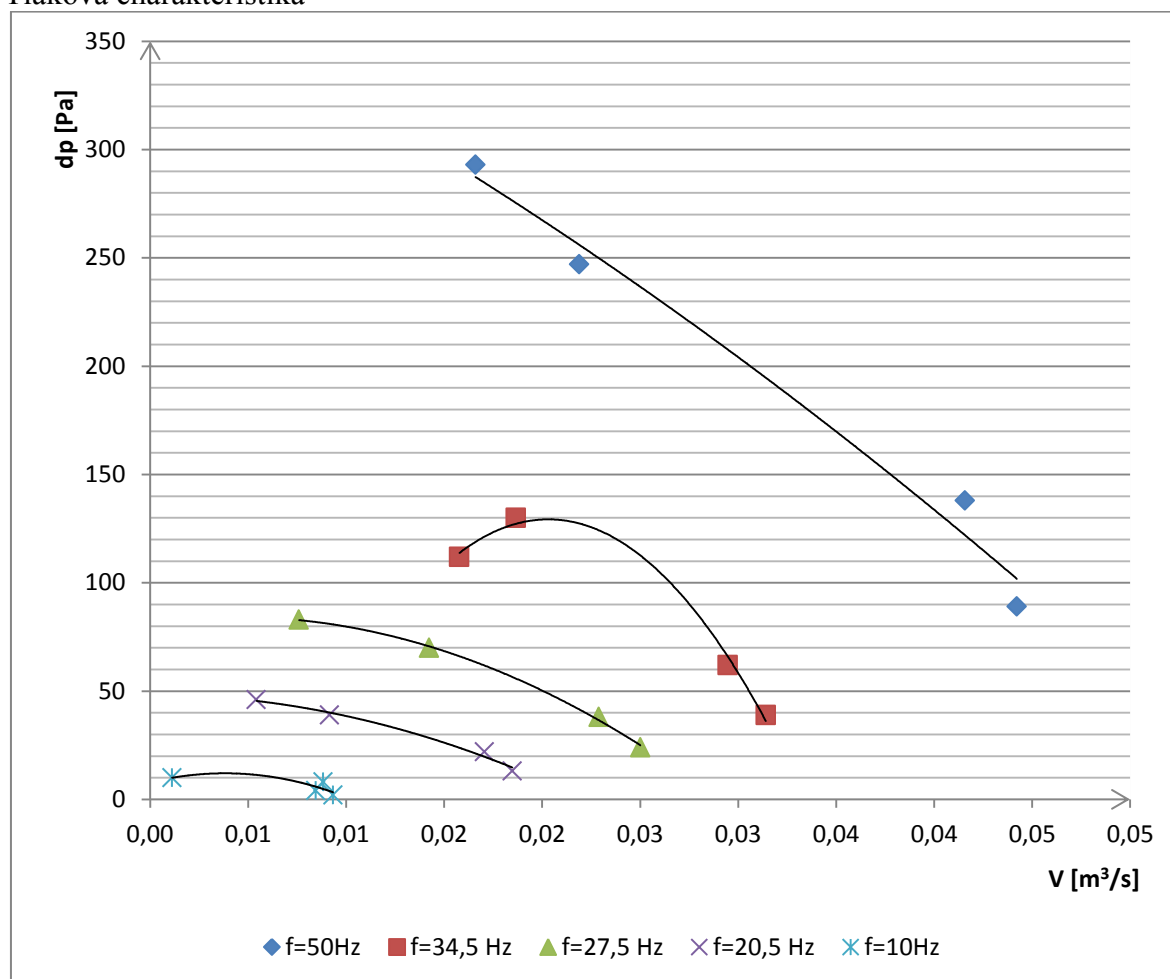


Obr. 3.6 Charakteristika ventilátoru IV

Tento ventilátor měl oběžné kolo mnohem menší než předchozí ventilátory, jeho rozměr byl 138mm a šířka 39mm. Nejvyšší průtok $\dot{V} = 0,048 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ byl při měření nezaškrceného potrubí pro frekvenci 50Hz. Tlaková diference $\Delta p = 94 \text{ Pa}$ je řádově nižší než u předchozích ventilátorů. U tohoto ventilátoru nemají charakteristiky vzájemnou podobnost jako u předchozích ventilátorů. Sice se při snižování otáček posouvají k počátku souřadného systému, ale jejich vzájemná podobnost není taková jako v předchozích případech.

3.6.5 Ventilátor V

Tlaková charakteristika



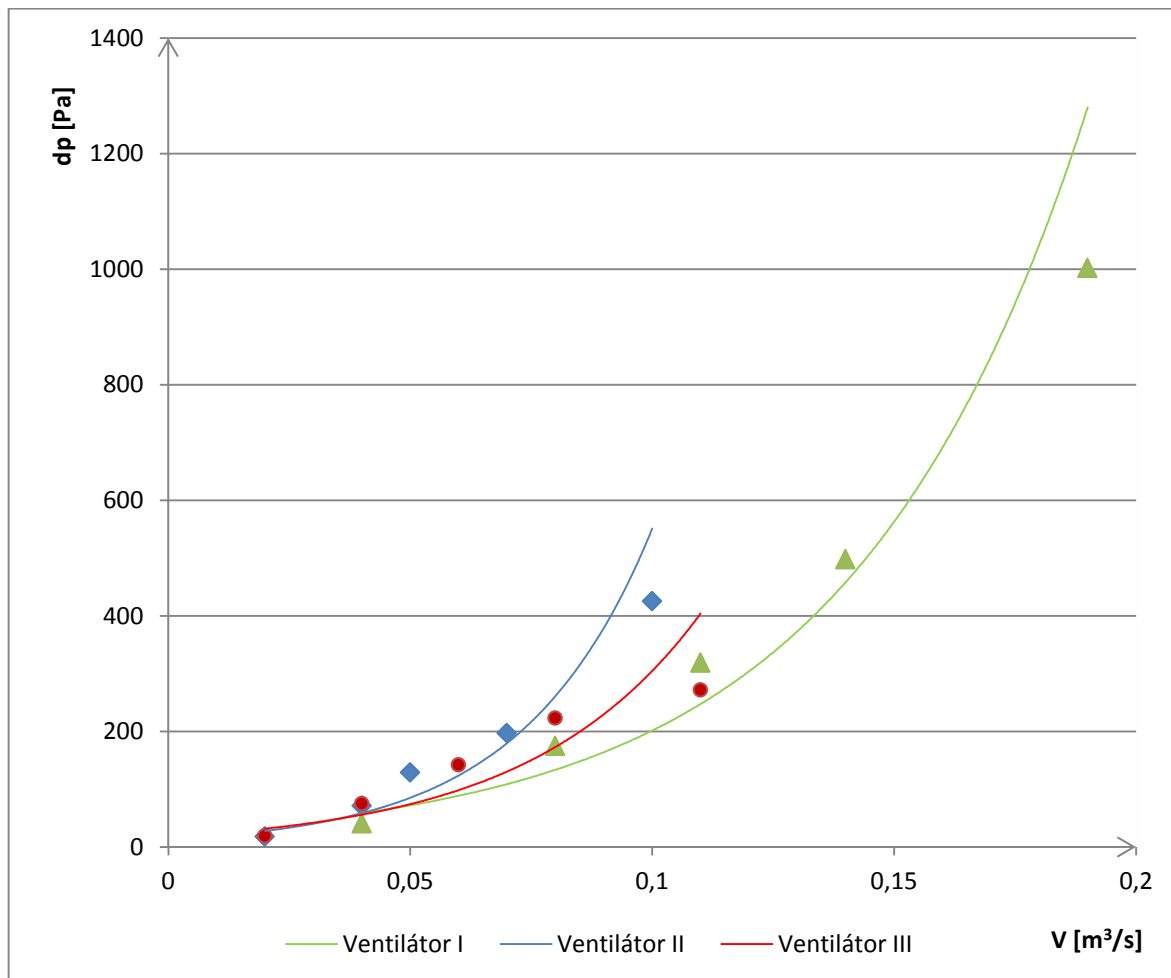
Obr. 3.7 Charakteristika ventilátoru V

Druhý z „malých“ a poslední z měřených ventilátorů měl stejnou velikost oběžného kola než ventilátor IV a měl o 10 mm menší šířku. Velikostí největšího průtoku $\dot{V} = 0,044 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a hodnotou tlakové difference v daném bodě $\Delta p = 89 \text{ Pa}$ je srovnatelný s ventilátorem IV.

Porovnáním ventilátoru IV a V ukazuje podobné závěry jako při porovnání II a III. Při podobné geometrii dostáváme podobné hodnoty. Rozdíly v rychlosti jsou do 0,5 m/s, průtok se liší 1 l/s.

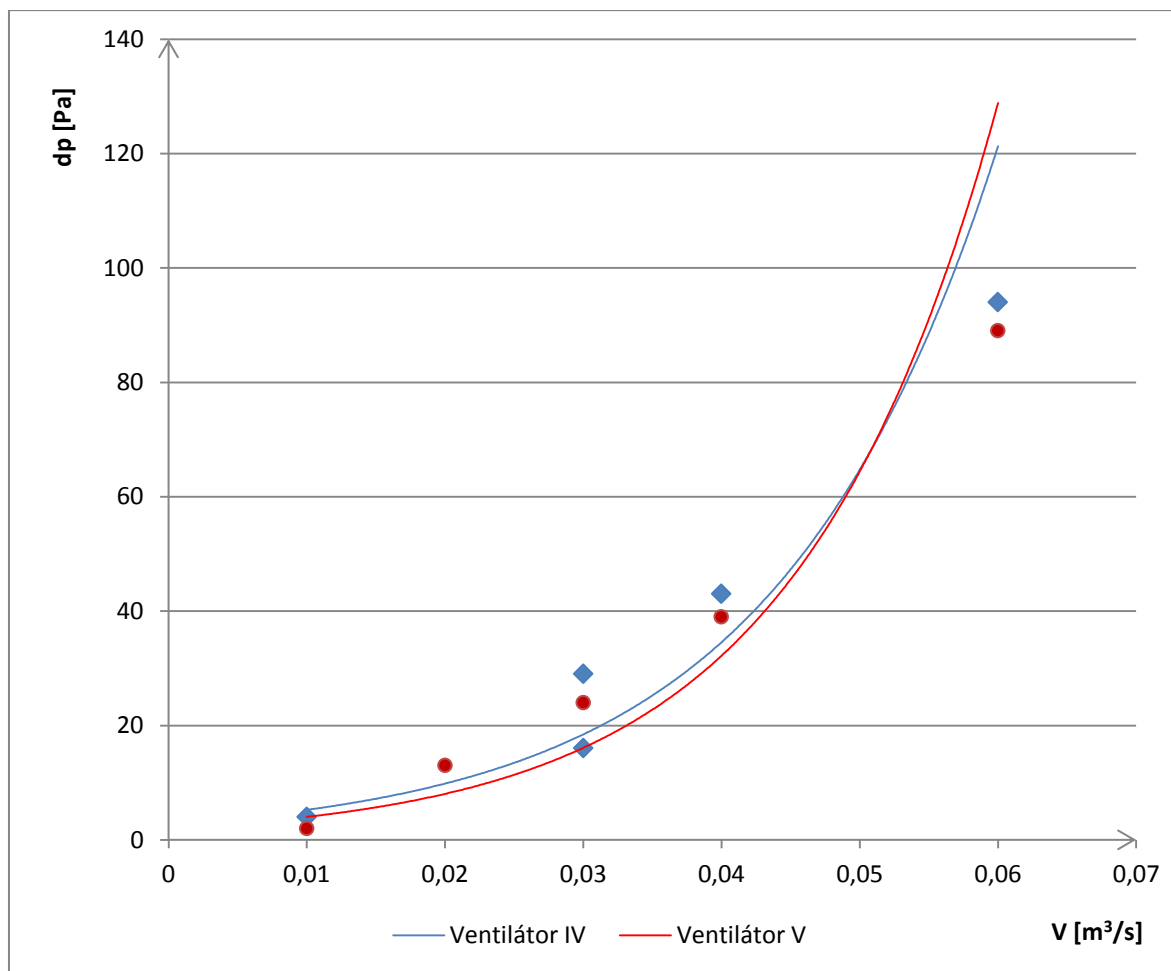
Rozdíly v charakteristikách „malých“ a „velkých“ ventilátorů jsou patrné. Ventilátory I, II a III pracují s většími rychlostmi a průtoky. Jejich stlačení je místy i desetkrát větší než u „malých ventilátorů“. Tato situace byla způsobena použitím jiného elektromotoru.

3.6.6 Charakteristika potrubní sítě



Obr. 3.8 Charakteristika potrubní sítě ventilátoru I, II, III

Na obr. 3.8 je zobrazena závislost tlakové difference Δp na objemovém průtoku \dot{V} . Jednotlivé body charakteristiky byly vybrány pro jednotlivé měřené frekvence při nezaškrceném potrubí. Podle teoretického předpokladu by tato závislost měla mít exponenciální průběh, což toto měření potvrzuje. Z obrázku je zřejmé, že při zvyšování frekvence elektromotoru a tím i zvyšování otáček ventilátoru roste tlaková difference, která je potřebná k dosažení průtoku. Charakteristiky potrubí se pro jednotlivé ventilátory odlišují. Každý ventilátor díky své geometrii dosahuje jiného stlačení vzduchu. Největší stlačení se vyskytují u ventilátoru I, který pracuje s nejvyššími průtoky. U ventilátorů II a III se charakteristiky podobají, což je způsobeno jejich podobností. V charakteristice se projevují ztráty třením v potrubí.



Obr. 3.9 Charakteristika potrubní sítě ventilátoru IV a V

Ventilátory IV a V mají menší geometrii a při měření byl použit jiný elektromotor, proto nedosahují takových stlačených jako „větší“ ventilátory. Stejně jako ventilátory i charakteristiky jsou si podobné.

4 Závěr

S ventilátory se setkáváme v běžném životě častěji, než si myslíme. Objevují se téměř všude - v elektronice, v dopravních prostředcích, na toaletách (sušičky rukou). Největší zastoupení mají přirozeně ve vzduchotechnice. Dopravují nebo odvádějí médium (vzduch, spaliny) na místa, kam uživatel potřebuje. Základní rozdělení ventilátorů je podle směru průtoku vzduchu. Největší zastoupení mají ventilátory radiální a axiální. Negativní jevy, které provázejí provoz ventilátorů, jsou především chvění a hluk. Při provozu ventilátoru je nebezpečné pohybovat se v oblasti blízké rezonanční frekvenci.

Charakteristiky jsou pro ventilátory důležitým parametrem. Charakteristiky nelze zjistit empirickými vztahy - musejí se určit experimentálně. Nezjišťuje si je sám uživatel ale výrobce, který charakteristiky přikládá jako dokumentaci. V této bakalářské práci se charakteristiky určovaly pro pět radiálních ventilátorů. Tři ventilátory měly oběžné kolo o průměru přibližně 35 cm, průměr kol zbylých dvou byl skoro 14 cm. Potrubí bylo k ventilátorům připevněno na výtlaku i na sání (typ C). K určení charakteristik se použilo škrcení potrubí pomocí škrticí klapky. Rychlost se měřila vrtulkovým anemometrem.

Nejvyšších hodnot objemového průtoku dosahoval ventilátor I ($\dot{V} = 0,139 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Hodnoty největších průtoků ostatních „větších“ ventilátorů se pohybovaly kolem $0,075 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Průtoky Ventilátorů IV a V dosahovaly hodnoty $0,045 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Těchto průtoků ventilátory dosahovaly při maximální frekvenci elektromotoru a při nezaškrceném potrubí. Při snižování frekvence (a tím i otáček) klesala rychlost vzduchu, tím se snižoval i objemový (hmotnostní) průtok. Při rovnoměrném snižování frekvence klesala rychlost také rovnoměrně. Pro stejné podmínky měření - stejný motor, stejná frekvence se během měření ukazují různé závislosti. Při rozšiřování geometrie ventilátoru dochází ke snižování rychlosti, protože se zvětšuje velikost průtočného kanálu. Abychom dosáhli stejného průtoku u dvou různě širokých ventilátorů, musí širší ventilátor pracovat při menších otáčkách - rychlost vzdušiny se sníží. Jde o zákon zachování hmoty, který popisuje rovnice kontinuity. Se změnou geometrie tedy dochází ke změně charakteristiky. Což potvrzuje tvrzení, že ventilátorové charakteristiky se musí zjišťovat experimentálně. Při měření a následném vyhodnocování se musí postupovat pečlivě. Získání přesných charakteristik a provozních bodů umožní efektivně využívat ventilátory. Je naprosto jasné, že efektivní využití čehokoli snižuje náklady spojené s provozem.

Takto naměřené charakteristiky jsou velmi hrubé. Pro jemnější vykreslení by bylo potřeba více měřicích poloh škrticí klapky a více frekvencí elektromotoru.

Literatura

- [1] ČERMÁK, Jan et al. *Ventilátory*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1974. 410 s.
- [2] NOVÝ, Richard. *Ventilátory*. 3.vyd. Praha: Česká technika, 2007. 104 s. ISBN 978-80-01-03758-4.
- [3] CHYSKÝ, Jaroslav, Karel HEMZAL et al. *Větrání a klimatizace*. 3.vyd. Brno: Bolit, 1993. 560 s. ISBN 80-901574-0-8.
- [4] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopátkové stroje*. 1.vyd. Brno: CERM, 2003. 178 s. ISBN 80-7204-297-1
- [5] ĎAŘO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladin*. 1.vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. Větrné turbíny a ventilátory, *Transformační technologie*, 2011-06, [last updated 2014-03]. [cit. 1. 5. 2014] Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/vetrne-turbiny-a-ventilatory.html>.
- [7] ŠKORPÍK, Jiří. Lopátkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2014-02]. [cit. 1. 5. 2014] Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>.
- [8] ZMRHAL, Vladimír. *Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 1.část* [online]. c2006,poslední revize 4. 12. 2006 [cit. 1. 5. 2014]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>.
- [9] SNÁŠEL, Pavel. *Vlhký vzduch 3.0*. [online]. 2014 [cit. 24. 4. 2014] Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/ot/studijni-pomucky-seminar-aplikovane-termomechaniky-2>
- [10] SCHWARZER, Jan. *Charakteristika ventilátoru*. Praha 2011 [cit. 2. 5. 2014] Dostupné z: https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/IB_EXM_char_ventilatoru_FINAL.pdf
- [11] VZDUŠINA. *Vševěd* [online]. 2011 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: <http://encyklopedie.vseved.cz/vzdu%C5%A1ina>
- [12] KOMPRESNÍ POMĚR. *Vševěd* [online]. 2011 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: http://encyklopedie.vseved.cz/kompresn%C3%AD_pom%C4%9Br
- [13] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. ISBN 80-214-2037-5.
- [14] Testo 454 - *User manual*. [online]. 2006 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: http://ktest.sk/testo2006/Multi_function/testo_454.pdf

- [15] Testo 512 - Pressure Meter. *Testo Limited* [online]. 2014 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.testolimited.com/p/289/testo-512-pressure-meter#fulldescription>
- [16] Testo 610 - Compact Humidity/Temperature Meter. *Testo Limited* [online]. 2014 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.testolimited.com/p/276/testo-610-compact-humiditytemperature-meter>
- [17] Digitální ruční otáčkoměr. *Conrad Electronic* [online]. 2013 [cit. 22. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.voltcraft.cz/digitalni-rucni-otackomer-dt-20lk.k123084>

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

- Obr. 2.1 Obecné charakteristiky ventilátoru [8]*
Obr. 2.2 Charakteristika potrubní sítě [2]
Obr. 2.3 Typy instalace ventilátoru v potrubním zřízení[1]
Obr. 2.4 Regulace ventilátoru škrcením [1]
Obr. 2.5 Regulace ventilátoru změnou otáček [3]
Obr. 2.6 Směr průtoku vzdušiny oběžným kolem ventilátoru [1]
Obr. 2.7 Ventilátor připojený napřímo [2]
Obr. 2.8 Ventilátor připojený přes spojku [2]
Obr. 2.9 Radiální ventilátor [2]
Obr. 2.10 Axiální ventilátor[2]
Obr. 2.11 Schéma axiálního ventilátoru [1]
Obr. 2.12 Tvary difusorů[1]
Obr. 2.13 Schéma radiálního ventilátoru [1]
Obr. 2.14 Výstupní trojúhelníky radiálního ventilátoru [1]
Obr. 2.15 Spirální skříň s paralelními bočnicemi[1]
Obr. 3.1 Měřicí trať
Obr. 3.2 Měřicí body
Obr. 3.3 Charakteristika ventilátoru I
Obr. 3.4 Charakteristika ventilátoru II
Obr. 3.5 Charakteristika ventilátoru III
Obr. 3.6 Charakteristika ventilátoru IV
Obr. 3.7 Charakteristika ventilátoru V
Obr. 3.8 Charakteristika potrubní sítě ventilátoru I
Obr. 3.9 Charakteristika potrubní sítě ventilátoru II a III
Obr. 3.10 Charakteristika potrubní sítě ventilátoru IV a V

Tabulky

- Tab. 3.1 Geometrie měřených ventilátorů*
Tab. 3.2 Asynchronní elektromotory s měničem frekvence - parametry
Tab. 3.3 Použité měřicí přístroje
Tab. 3.4 Měřicí body
Tab. 3.5 Podmínky při měření
Tab. 3.6 Ventilátor I - naměřené hodnoty
Tab. 3.8 Ventilátor II - naměřené hodnoty
Tab. 3.9 Ventilátor III - naměřené hodnoty
Tab. 3.10 Ventilátor IV - naměřené hodnoty
Tab. 3.11 Ventilátor V - naměřené hodnoty
Tab. 3.12 Přírůstky plochy
Tab. 3.11 Hustota vzduchu při měření
Tab. 3.13 Ventilátor I - vypočítané hodnoty
Tab. 3.14 Ventilátor II - vypočítané hodnoty
Tab. 3.15 Ventilátor III - vypočítané hodnoty
Tab. 3.16 Ventilátor IV - vypočítané hodnoty
Tab. 3.17 Ventilátor V - vypočítané hodnoty

Seznam zkratk a použitých symbolů

1-D		jednorozměrné
mv		měřená veličina
mr		měřicí rozsah
jed.		jednotka
b	[m]	šířka oběžného kola
c	[m.s ⁻¹]	absolutní rychlost vzdušiny
cosφ	[-]	účinník
D	[m]	velký průměr oběžného kola
E	[J.kg ⁻¹]	měrná energie
f	[Hz]	frekvence
g	[m.s ⁻²]	gravitační zrychlení
h	[m]	výška
k	[N.m ⁻¹]	tuhost hřídele
l	[m]	délka
m	[kg]	hmotnost
n	[s ⁻¹]	otáčky
p	[Pa]	tlak
P	[W]	výkon
r	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	plynová konstanta
S	[m ²]	plocha
T	[K]	termodynamická teplota
t	[°C]	atmosférická teplota
u	[m.s ⁻¹]	obvodová rychlost oběžného kola
U	[U]	napětí
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
V	[m ³]	objem
w	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost vzdušiny
γ	[-]	úhel nastavení
ζ	[-]	ztrátový součinitel mříže
η	[-]	účinnost
κ	[-]	stupeň reakce
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
τ	[s]	čas
Φ	[m]	průměr
φ	[%]	atmosférická vlhlost
ω	[s ⁻¹]	uhlová rychlost
\dot{M}	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní průtok
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	objemový průtok

Seznam indexů

h	hydraulický
z	ztrátový
c	celkový
u	unášivý
stat.	statický
D	difuzorový
k	kritický
s	sání
v	výtlač
w	vzduchu
stř.	střední
t	teoretický